Max Tegmark

En busca de la naturaleza última de la realidad



En *Nuestro universo matemático*, Max Tegmark, uno de los físicos en activo más originales, nos conduce por un asombroso viaje que explora los misterios revelados por la cosmología, permitiéndonos descubrir la naturaleza de la realidad. Parte historia del cosmos, parte aventura intelectual, *Nuestro universo matemático* viaja desde el Big Bang hasta el futuro distante a través de mundos paralelos, a lo largo de todas las escalas posibles —desde la subatómica hasta la intergaláctica—, mostrando cómo las matemáticas proporcionan respuestas a nuestras preguntas sobre el mundo. ¿De dónde venimos? ¿Qué hace que el universo sea como es? En definitiva, ¿por qué estamos aquí? Con claridad meridiana, Max Tegmark examina estos misterios profundos permitiéndonos adentrarnos en las más vanguardistas y alucinantes teorías de la física. Lo que propone es una idea elegante y fascinante a la vez: que nuestro mundo físico no sólo puede ser descrito por las matemáticas, sino que es matemáticas.

Max Tegmark

Nuestro universo matemático

En busca de la naturaleza última de la realidad

ePub r1.0

Un_Tal_Lucas 22-08-2021

Título original: *Our Mathematical Universe. My quest for the ultimate nature of reality*
Max Tegmark, 2012
Traducción: Dulcinea Otero-Piñeiro

Editor digital: Un_Tal_Lucas
ePub base r2.1


Para Meia, mi inspiración para escribir este libro

Prólogo

Quisiera manifestar mi gratitud más profunda a todas las personas que me animaron y ayudaron a escribir este libro, entre las que se cuentan:

Mi familia, amigos, profesores, compañeros de trabajo y colaboradores, por el apoyo y la inspiración que me brindaron en el transcurso de los años.

Mamá, por transmitirme su entusiasmo y curiosidad por los grandes interrogantes de la vida.

Papá, por compartir conmigo su fascinación por las matemáticas y su significado, así como su sabiduría en esta materia.

Mis hijos, Philip y Alexander, por plantearme cuestiones tan formidables sobre el mundo y por surtirme de anécdotas para el libro sin ser conscientes de ello.

Todos los entusiastas de la ciencia que han contactado conmigo desde cualquier parte del mundo a lo largo de los años con preguntas, comentarios y ánimos para profundizar en mis ideas y publicarlas.

Mis agentes, John y Max Brockman, por convencerme para escribir este libro y echarlo a rodar.

Todos los que aportaron observaciones sobre fragmentos del manuscrito, como mamá, mi hermano Per, Josh Dillon, Marty Asher, David Deutsch, Louis Helm, Andréi Linde, Jonathan Lindström, Roy Link, David Raub, Shevaun Mizrahi, Mary New, Sandra Simpson, Carl Shulman y Jaan Tallinn.

Los superhéroes que comentaron borradores del libro íntegro, es decir, Meia, papá, Paul Almond, Julian Barbour, Phillip Helbig, Adrian Liu, Howard Messing, Dan Roberts, Edward Witten y mi editor, Dan Frank.

Y, sobre todo, mi querida esposa, Meia, mi musa y compañera de viaje, que me ha brindado más estímulo, apoyo e inspiración de lo que jamás llegué a soñar.

1
¿Qué es la realidad?

… los árboles consisten básicamente en aire. Cuando arden, vuelven al aire, y con el calor ardiente se libera el calor ardiente del Sol que se concentró para convertir el aire en árbol. Y en la ceniza queda el pequeño residuo de lo poco que no salió del aire, sino que salió de la tierra sólida.

Richard Feynman

Hay más cosas en el cielo y la tierra, Horacio, que las vislumbradas en tu filosofía.

William Shakespeare,
Hamlet, acto 1, escena 5

Las apariencias engañan

Un segundo después fallecí. Dejé de pedalear y accioné los frenos, pero era demasiado tarde. Unos faros. Una rejilla. La bocina furibunda de 40 toneladas de acero, como un dragón de la modernidad. Vi el pánico en los ojos del conductor del camión. Sentí pararse el tiempo y toda mi vida pasando ante mí, y el último pensamiento que tuve en la vida fue: «Tiene que ser una pesadilla». Pero en mis entrañas sabía que era real.

¿Cómo puedo estar tan seguro de que no estaba soñando? ¿Y si justo antes del impacto hubiera percibido algo que no pudiera ocurrir nada más que en el mundo de los sueños; por ejemplo, que mi antigua profesora Ingrid, ya fallecida, fuera sentada detrás de mí en el portabultos de la bici? O ¿y si, cinco segundos antes, hubiera visto desplegarse un cartel en el ángulo superior izquierdo de mi campo de visión con el mensaje: «¿Estás seguro de que es buena idea circular a toda velocidad por este paso inferior sin mirar hacia la derecha?», con las teclas *Continuar* y *Cancelar* debajo de él? Si hubiera visto suficientes películas del estilo de *Matrix* y *Nivel 13*[1], habría empezado a sospechar que toda mi vida había sido una simulación de ordenador, y eso me llevaría a cuestionarme algunas de mis suposiciones más

esenciales sobre la naturaleza de la realidad. Pero no experimenté nada de eso, y fallecí convencido de que mi problema era real. Al fin y al cabo, ¿qué puede haber más consistente y real que un camión de 40 toneladas?

Sin embargo, no todo es lo que parece en un principio, y esto se aplica incluso a los camiones y a la realidad misma. Este planteamiento no procede únicamente de filósofos y escritores de ciencia ficción, sino también de experimentos físicos. En física se sabe desde hace un siglo que en realidad el duro acero se compone en su mayoría de espacio vacío, porque los núcleos atómicos que conforman el 99,95 % de la masa son esferas minúsculas que tan solo cubren el 0,000000000001 % del volumen, y que este vacío casi absoluto solo parece sólido debido a la enorme intensidad de las fuerzas eléctricas que mantienen esos núcleos en su lugar. Es más, mediciones minuciosas de partículas subatómicas han revelado que parecen capaces de estar en distintos lugares al mismo tiempo, un misterio bien conocido y alojado en el mismísimo corazón de la física cuántica (ahondaremos en esta cuestión en el capítulo 7). Pero yo estoy formado por partículas como esas, así que si ellas pueden estar en dos sitios a la vez, ¿no podré estarlo también yo? De hecho, unos tres segundos antes del accidente, mi subconsciente se debatía entre mirar tan solo hacia la izquierda, hacia donde siempre giraba camino de mi centro de enseñanza secundaria en Suecia, el Bfackebergs Gymnasium, porque en este cruce nunca había tráfico, o si mirar también hacia la derecha por si las moscas. La desafortunada decisión rápida que tomé aquella mañana de 1985 salió así por muy poco. Todo lo desencadenó la entrada de un átomo de calcio en una unión sináptica determinada de mi corteza prefrontal, lo que provocó que una neurona concreta lanzara una señal eléctrica que desató toda una cascada de actividad en otras neuronas del cerebro que colectivamente codificaron el mensaje: «No te molestes». Así que, si ese átomo de calcio hubiera estado al principio en dos lugares ligeramente distintos al mismo tiempo, entonces medio segundo después, yo habría dirigido las pupilas en dos direcciones opuestas a la vez, dos segundos más tarde la bicicleta habría estado en dos lugares diferentes al mismo tiempo, y en breve yo habría estado muerto y vivo simultáneamente. Los especialistas más destacados del mundo en física cuántica mantienen un debate acalorado sobre si esto ocurre de verdad, lo que en la práctica dividiría nuestro mundo en universos paralelos con historias diferentes, o si la llamada *ecuación de Schrödinger*, la ley suprema del movimiento cuántico, debe modificarse en alguna medida. Entonces ¿fue real mi deceso? Casi ocurrió en este universo concreto, pero ¿fallecí en otro universo igual de real en el que este libro nunca llegó a

escribirse? Y, si estoy tanto muerto como vivo, ¿podemos modificar de alguna manera nuestra noción de lo que es la realidad para que todo esto cobre sentido?

Si el lector tiene la sensación de que lo que acabo de contarle suena absurdo y de que la física está embrollando las cosas, el asunto empeora aún más si también se tiene en cuenta mi percepción personal de los hechos. Si me encontrara en esos dos sitios diferentes de dos universos paralelos, una versión de mí sobreviviría. Si aplicamos el mismo razonamiento a todas las situaciones en las que pueda fallecer en el futuro, parece que siempre habrá al menos un universo paralelo en el que jamás moriré. Como mi conciencia existe tan solo allí donde estoy vivo, ¿significa esto que subjetivamente me sentiré inmortal? En tal caso, ¿se sentirá también usted subjetivamente inmortal y, con el paso del tiempo, la persona más anciana de la Tierra? Responderemos a estos interrogantes en el capítulo 8.

¿Le sorprende que la física haya desvelado que nuestra realidad es mucho más extraña de lo que habíamos imaginado? Bueno, lo cierto es que no resulta nada sorprendente ¡si nos tomamos en serio la evolución darwiniana! La evolución nos dotó de intuición únicamente para esos aspectos de la física relevantes para la supervivencia de nuestros ancestros remotos, como las órbitas parabólicas de las piedras que vuelan por los aires (lo que explica nuestra afición al béisbol). Si una cavernícola se concentrara demasiado en reflexionar sobre la composición última de la materia, no repararía en el tigre que merodea a sus espaldas y desaparecería al instante del acervo génico. Por tanto, la teoría de Darwin establece la predicción constatable de que siempre que usemos tecnología para atisbar la realidad más allá de una escala humana, fracasará la intuición que hemos desarrollado en el transcurso de la evolución. Hemos comprobado esta predicción una y otra vez, y los resultados en favor de Darwin son abrumadores. Einstein descubrió que a velocidades elevadas el tiempo se frena, y a los cascarrabias del comité sueco del Nobel les sonó tan raro que se negaron a concederle el premio por la teoría de la relatividad. A temperaturas bajas, el helio líquido fluye hacia arriba. A temperaturas elevadas, las partículas en colisión cambian de identidad; el hecho de que un electrón se convierta en un bosón Z tras chocar con un positrón me resulta igual de intuitivo que si la colisión entre dos coches diera lugar a un trasatlántico. A escalas microscópicas, las partículas aparecen esquizofrénicamente en dos lugares a la vez, lo que conduce a los dilemas cuánticos mencionados más arriba. A las grandes escalas espaciales astronómicas (¡sorpresa!) lo extraño ataca de nuevo: si su intuición le permite

entender todos los aspectos de los agujeros negros, creo que pertenece a una minoría formada por una sola persona y que debe dejar a un lado este libro y publicar sus descubrimientos antes de que alguien le robe el Premio Nobel por la gravedad cuántica. Si ponemos el foco en escalas aún mayores, nos aguardan más rarezas en una realidad mucho más grandiosa que todo lo que alcanzamos a ver con los mejores telescopios. Tal como exploraremos en el capítulo 5, la teoría más aceptada sobre lo que ocurrió en los primeros instantes recibe el nombre de inflación cosmológica, y defiende que el espacio no solo es verdaderamente colosal, sino que es infinito y que alberga una cantidad infinita de copias exactas de usted, e incluso una cantidad aún mayor de reproducciones similares a usted que viven todas las variantes posibles de su vida en dos clases diferentes de universos paralelos. Si esta teoría se demostrara cierta, significaría que aunque hubiera algún error en el razonamiento cuántico que expuse con anterioridad en relación con aquella copia de mí que nunca llegó a su centro de enseñanza, habría una cantidad infinita de otros Max en lejanos sistemas solares del espacio que llevarían una vida idéntica a la mía hasta ese instante fatídico en el que decidieron no mirar a la derecha.

En otras palabras, los descubrimientos de la física desafían algunas de nuestras ideas esenciales sobre la realidad, *tanto* cuando observamos de cerca el microcosmos *como* cuando enfocamos al macrocosmos. Tal como veremos en el capítulo 11, el empleo de la neurociencia para ahondar en el funcionamiento del cerebro cuestiona muchas ideas relacionadas con la realidad incluso a la escala intermedia humana.

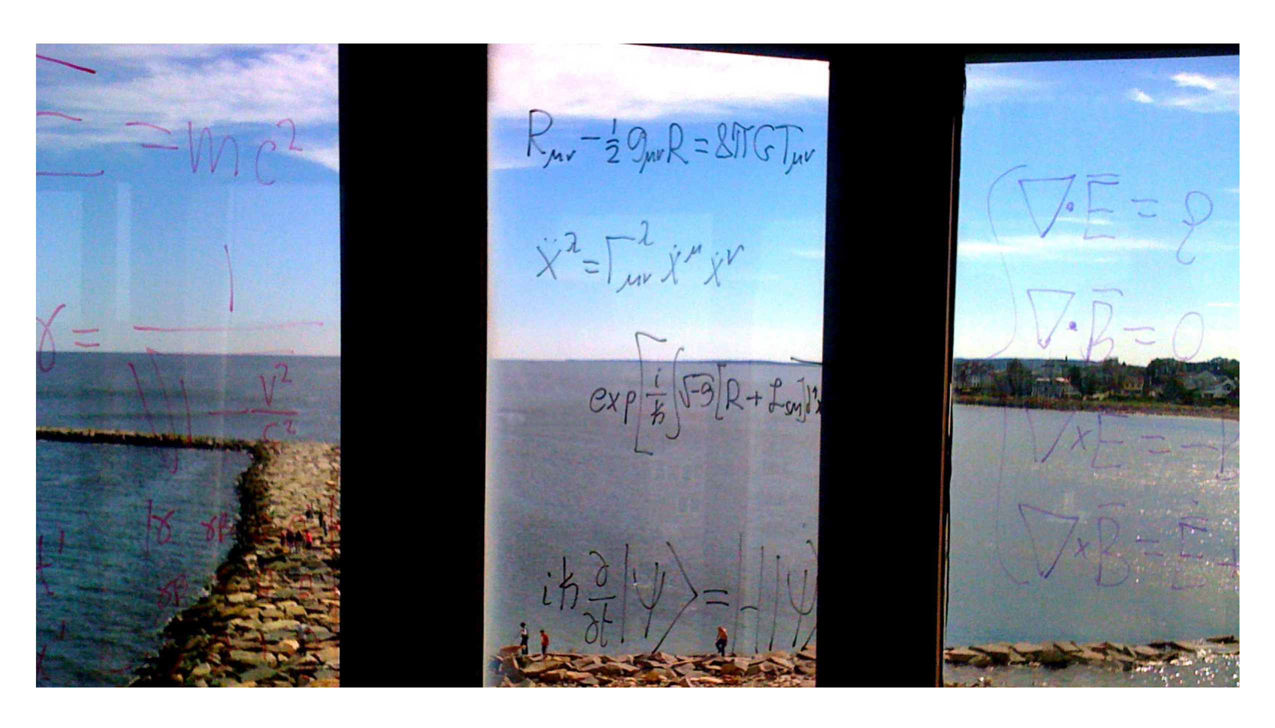


Figura 1.1: Cuando miramos la realidad a través de las ecuaciones de la física, nos encontramos que describen patrones y regularidades. Pero para mí las matemáticas son mucho más que una ventana para observar el mundo exterior: en este libro defenderé que nuestro mundo físico no solo se *describe* a través de las matemáticas, sino que *es* matemáticas: una estructura matemática, para ser exactos.

Por último, aunque no por ello menos importante, sabemos que las ecuaciones matemáticas ofrecen una ventana por la que escudriñar los mecanismos de la naturaleza, tal como se ilustra de manera metafórica en la figura 1.1. Pero ¿por qué el mundo físico que habitamos ha revelado una regularidad matemática tan extrema como para que el superhéroe de la astronomía Galileo Galilei proclamara que la naturaleza es «un libro escrito en lenguaje matemático» y como para que el premio Nobel Eugene Wigner recalcara que la «ilógica efectividad de las matemáticas en las ciencias físicas» es un misterio que requiere una explicación? La respuesta a este interrogante constituye el objetivo primordial de este libro, tal como trasluce su título. En los capítulos 10 a 12, indagaremos en las fascinantes relaciones entre la computación, las matemáticas, la física y la mente, y exploraremos una de mis convicciones aparentemente más descabelladas, que nuestro mundo físico no solo se *describe* mediante las matemáticas, sino que *es* matemáticas, lo que nos convierte en partes conscientes de un objeto matemático gigante. Tal como veremos, esto conduce a un conjunto nuevo y definitivo de universos paralelos tan vasto y exótico que todas las extravagancias mencionadas con anterioridad se quedan raquíticas a su lado, lo que nos obliga a renunciar a muchas de las nociones más arraigadas que tenemos sobre la realidad.

¿Cuál es la pregunta definitiva?

No hay duda de que durante todo el tiempo que nuestros ancestros humanos han deambulado por la Tierra se han preguntado en qué consiste la realidad mediante el planteamiento de grandes cuestiones existenciales. *¿De dónde salió todo? ¿Cómo acabará? ¿Qué tamaño tiene el todo?* Estos interrogantes son tan seductores que prácticamente todas las culturas humanas del orbe los han abordado y han transmitido respuestas de generación en generación, en forma de elaborados mitos, leyendas y doctrinas religiosas de la creación. Tal como ilustra la figura 1.2, se trata de preguntas tan difíciles que no ha habido ningún consenso global para darles respuesta. Lejos de que todas las culturas convergieran en una cosmovisión única que pudiera constituir la verdad definitiva, las respuestas presentan grandes diferencias, algunas de las cuales,

al menos, parecen reflejar sus diferentes estilos de vida. Por ejemplo, en todos los mitos de la creación procedentes del antiguo Egipto, donde el río Nilo mantenía la tierra fértil, el mundo emerge de las aguas. En mi Suecia natal, en cambio, donde el fuego y el hielo solían ejercer gran repercusión en la supervivencia, la mitología nórdica afirmaba que la vida surgió (¡sorpresa!) del fuego y del hielo.



Figura 1.2: Muchas cuestiones cosmológicas que abordaremos en este libro han fascinado a pensadores de todos los tiempos, pero nunca ha surgido un consenso global. Esta clasificación se basa en una presentación que expuso el estudiante de grado David Hernández del MIT en mi curso de cosmología. Como estas taxonomías tan simplistas son estrictamente imposibles, deben considerarse con grandes reservas: muchas religiones tienen múltiples ramas e interpretaciones, y algunas se dividen en numerosas categorías. Por ejemplo, el hinduismo contiene aspectos de las tres variantes que se dan aquí para la creación: según cierta leyenda, tanto el dios Brahma (representado) como este universo emergieron de un huevo, el cual, a su vez, habría surgido de las aguas.

Las culturas antiguas persiguieron otros interrogantes como mínimo igual de esenciales: *¿Qué es real? ¿Hay algo más en la realidad que lo que perciben los ojos? ¡Sí!*, respondió Platón hace más de dos milenios. En la conocida analogía de la caverna, nos equiparaba con personas que pasan toda la existencia dentro de una caverna frente a un muro liso contemplando las sombras que proyectan sobre él las cosas que ocurren detrás, y que al final acaban creyendo erróneamente que esas sombras constituyen toda la realidad. Platón decía que lo que los humanos consideramos la realidad cotidiana es, de manera análoga, una mera representación limitada y distorsionada de la verdadera realidad, y que para empezar a comprenderla debemos liberarnos de nuestras cadenas mentales.

Si mi vida de físico me ha enseñado algo, es que Platón estaba en lo cierto: la física moderna ha evidenciado con gran claridad que la naturaleza

última de la realidad no es lo que parece. Pero si la realidad no es lo que creíamos que era, entonces ¿qué es? ¿Qué relación hay entre la realidad interior de la mente humana y la realidad exterior? ¿De qué está hecho todo en última instancia? ¿Cómo funciona la realidad? ¿Por qué? ¿Tiene todo esto algún significado? Y en tal caso, ¿cuál es? Como dijo Douglas Adams en su parodia de ciencia ficción *Guía del autoestopista galáctico*[2]: «¿Cuál es la respuesta a la gran cuestión de la vida, del universo y del todo?».

Pensadores de todos los tiempos han aportado un abanico fascinante de respuestas al interrogante de qué es la realidad, ya fuera para responderla o para desestimarla. Ofrezco algunos ejemplos en forma de esquema (esta lista no pretende ser exhaustiva, y no todas las alternativas se excluyen entre sí).

Algunas respuestas a «**¿Qué es la realidad?**»	
La pregunta tiene una respuesta relevante.	Partículas elementales en movimiento. Tierra, viento, fuego, aire y quintaesencia. Átomos en movimiento. Cuerdas en movimiento. Campos cuánticos en un espacio-tiempo curvo. Teoría M (o tu letra mayúscula favorita…). Una creación divina. Una construcción social. Una construcción neurofisiológica. Un sueño. Información. Una simulación (al estilo de *Matrix*). Una estructura matemática. El multiverso del nivel IV.
La pregunta carece de respuesta relevante.	Existe una realidad, pero los humanos no podemos conocerla por completo: no tenemos acceso a lo que Immanuel Kant denominó la cosa en sí. La realidad es fundamentalmente incognoscible. No solo no la conocemos, sino que aunque la conociéramos no podríamos expresarla. La ciencia no es más que una historia, un relato (respuesta posmoderna de Jacques Derrida y otros). La realidad solo está en nuestra cabeza (respuesta constructivista). La realidad no existe (solipsismo).

Este libro (y en realidad toda mi carrera científica) es mi tentativa personal de abordar esta cuestión. Una de las razones por las que los pensadores han brindado ese amplio espectro de respuestas estriba sin duda en que han optado por interpretar el interrogante de maneras diferentes, así que me siento obligado a explicar aquí cómo lo interpreto yo y qué enfoque le daré. La palabra *realidad* tiene distintas connotaciones. Yo la uso para referirme a la naturaleza última del mundo físico exterior del que formamos parte, y me

fascina la idea de aspirar a comprenderla mejor. Entonces, ¿cuál es mi planteamiento?

Cuando estudiaba en el instituto de enseñanza secundaria, una noche empecé a leer la novela policiaca *Muerte en el Nilo*, de Agatha Christie. Aunque era muy consciente de que, por mucho que me doliera, el despertador sonaría a las siete de la mañana, no pude dejar de leerla hasta que se resolvió el misterio, hacia las cuatro de la madrugada. Las historias policiacas siempre me atrajeron desde la infancia, y hacia los doce años creé un club de detectives con mis compañeros de clase Andreas Bette, Matthias Bothner y Ola Hansson. Nunca pillamos a ningún delincuente, pero la idea de resolver misterios me cautivó. El interrogante de «¿qué es la realidad?» representa para mí la mayor aventura detectivesca, y considero una suerte inmensa que pueda dedicar una fracción tan grande de mi tiempo a esclarecerla. En los capítulos que siguen a continuación relataré otros momentos en los que la curiosidad me apresó hasta altas horas de la madrugada, totalmente incapaz de parar de leer hasta que el misterio quedara resuelto. Solo que en esas otras ocasiones no leía un libro, sino lo que escribía mi mano, y eso que yo escribía era un reguero de ecuaciones matemáticas con el convencimiento de que me acabarían conduciendo a una respuesta.

Yo soy físico y estoy hablando de un enfoque físico para indagar en los misterios de la realidad. Para mí, esto significa comenzar por los grandes interrogantes, como ¿qué tamaño tiene este universo?, y, ¿de qué está hecho todo?, y abordarlos exactamente igual que los enigmas detectivescos: mediante una combinación de observaciones y reflexiones agudas, y el seguimiento de cada una de las pistas dondequiera que nos lleve.

Empieza el viaje

¿Un enfoque físico? ¿No es esa una forma fantástica de convertir algo emocionante en aburrido? Cuando viajo en avión y la persona que me toca al lado me pregunta a qué me dedico, tengo dos opciones. Si me apetece charlar, respondo: «Astronomía», lo que siempre desencadena una conversación interesante[3]. Si no estoy de humor, respondo: «Física», instante en el que suelen decirme algo como: «¡Oh, fue mi peor asignatura en el instituto!», y me dejan en paz durante el resto del vuelo.

De hecho, la física también era la asignatura que menos me gustaba a mí en el instituto. Aún recuerdo la primera clase que tuve de física. El profesor

anunció con voz monótona y soporífera que íbamos a estudiar la densidad. Que la densidad es la masa dividida entre el volumen. Así que, si la masa era tal y el volumen cual, podíamos calcular que la densidad era blablablá. Lo único que recuerdo después de aquello es una gran nebulosidad y que siempre que le fallaban los experimentos, le echaba la culpa a la humedad y decía «esta mañana funcionó». También recuerdo que algunos amigos míos no entendían por qué no les salían los experimentos hasta que descubrían que les había gastado la trastada de pegarles un imán debajo del osciloscopio…

Cuando me llegó el momento de elegir universidad, opté por apartarme de la física y de otros campos técnicos, y acabé en la Escuela de Economía de Estocolmo para especializarme en temas medioambientales. Quería aportar mi granito de arena para convertir el planeta en un lugar mejor, y consideraba que el problema principal no era que no dispusiéramos de soluciones técnicas, sino que no usábamos debidamente la tecnología ya existente. Creía que el mejor modo de influir en el comportamiento de la gente consiste en tocarle el bolsillo, y me atraía la idea de crear incentivos económicos que aunaran el egoísmo personal con el bien común. Por desgracia, me desilusioné pronto, y llegué a la conclusión de que la economía es en gran medida una forma de prostitución intelectual donde te pagan por decir lo que los poderosos quieren oír. Cuando un político quiere hacer algo, siempre encuentra algún asesor economista que ya ha abogado por hacer justamente eso. Franklin D. Roosevelt quiso aumentar el gasto gubernamental, así que escuchó a John Maynard Keynes, mientras que Ronald Reagan quiso reducir el gasto gubernamental y prestó oídos a Milton Friedman.

Entonces, un compañero de clase, Johan Oldhoff, me dio un libro que lo cambió todo: *¿Está usted de broma, sr. Feynman?*[4]. Nunca llegué a conocer a Richard Feynman, pero me pasé a la física por él. Aunque el libro no trataba en realidad sobre física (se centraba más bien en cómo elegir una cerradura o cómo conseguir mujeres), logré leer entre líneas que este tipo era un enamorado de la física, lo que me dejó más que intrigado. Si te topas con un tipo de aspecto mediocre caminando del brazo de una mujer despampanante, lo más probable es que pienses que te falta algún dato. Seguramente ella habrá encontrado en él alguna cualidad oculta. De repente sentí lo mismo ante la física: ¿qué veía Feynman en ella que yo había pasado por alto en el instituto?

Solo tenía que resolver aquel misterio, así que me senté con el volumen I de la obra *Física*[5] de Feynman, que encontré en la biblioteca de papá, y empecé a leer: «Si algún cataclismo destruyera todo el conocimiento

científico, y la siguiente generación de criaturas solo recibiera una única frase, ¿qué enunciado contendría la máxima información con la menor cantidad de palabras?».

¡Guau, aquel tipo no se parecía en nada al profesor de física del instituto! Feynman proseguía: «Yo creo que sería […] todas las cosas están hechas de átomos, pequeñas partículas en movimiento perpetuo que se atraen entre sí cuando se sitúan a cierta distancia, pero que se repelen al apretarse unas contra otras».

Entonces se me encendió una luz en la cabeza. Continué leyendo y leyendo sin parar, fascinado. Me sentía como si estuviera viviendo una experiencia religiosa. ¡Y al fin lo conseguí! Encontré la gran revelación que explicaba lo que me había estado perdiendo y aquello que Feynman sí había captado: la física es la aventura intelectual definitiva, la búsqueda de la comprensión de los misterios más recónditos de este universo. La física no parte de algo fascinante y lo vuelve aburrido. Por el contrario, nos ayuda a ver con más claridad, lo que incrementa la belleza y la maravilla del mundo que nos rodea. Cuando voy al trabajo en bicicleta en otoño, contemplo el encanto de los árboles teñidos de rojos, naranjas y dorados. Pero al observar esos mismos árboles a través del cristal de la física descubrimos una hermosura aún mayor, la mencionada en la cita de Feynman que introduce este capítulo. Y cuanto más ahondo con la mirada, mayor elegancia vislumbro: en el capítulo 3 veremos que los árboles proceden en último término de las estrellas, y en el capítulo 8 veremos que el estudio de sus elementos constitutivos apunta a que también existen en universos paralelos.

En aquel entonces yo tenía una novia que estudiaba física en el Real Instituto de Tecnología, y sus libros de texto me parecían mucho más interesantes que los míos. Aquella relación no duró, pero mi amor por la física sí. Como la universidad era gratuita en Suecia, me matriculé en la universidad de aquella chica sin informar de mi doble vida secreta a la dirección de la Escuela de Economía de Estocolmo. Había comenzado oficialmente mi investigación detectivesca, y este libro es el informe que he preparado un cuarto de siglo después.

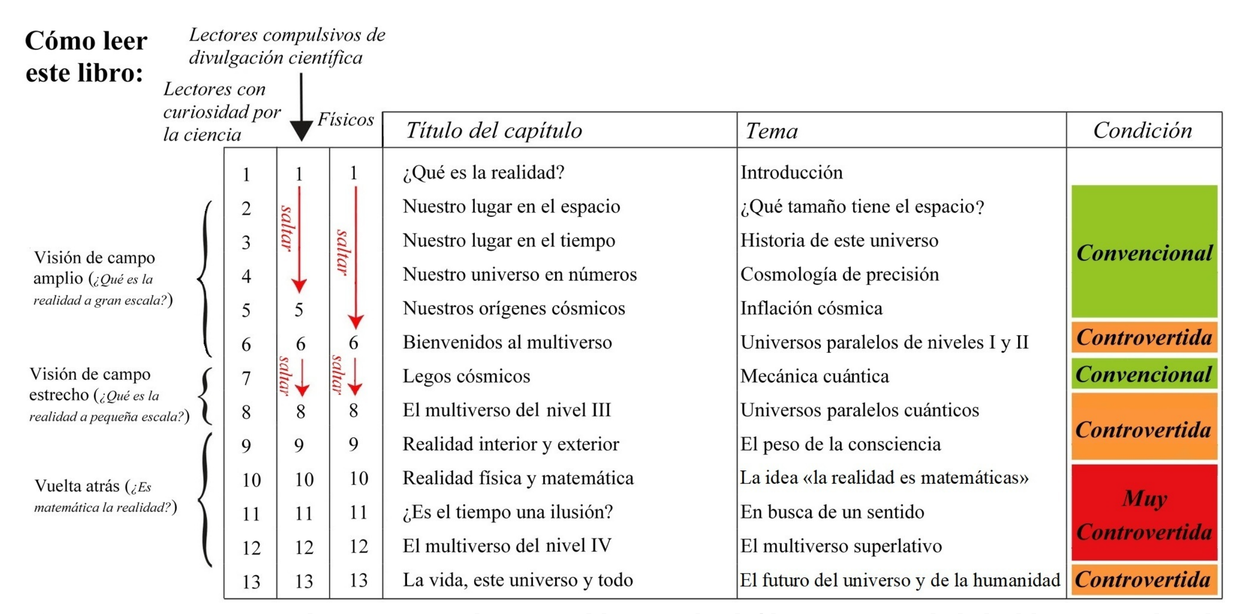
Entonces ¿qué es la realidad? Con este atrevido título no persigo la arrogancia de intentar venderle una respuesta definitiva (aunque en la última parte del libro analizaremos posibilidades fascinantes), sino invitar a quien me lea a que me acompañe en este viaje personal de exploración, y a compartir mi entusiasmo y mis reflexiones sobre estos misterios tan enriquecedores para la mente. Creo que, al igual que yo, usted también llegará a la conclusión de

que, sea lo que sea la realidad, difiere enormemente de lo que creíamos que era, y que constituye un enigma ubicado en el mismísimo centro de nuestra vida cotidiana. Confío en que, igual que a mí, también a usted le parezca que esto confiere a los problemas diarios, como las multas de aparcamiento o las aflicciones, una perspectiva alentadora que facilita tomárselos con calma y concentrarse más en disfrutar al máximo de la vida y de sus misterios.

La primera vez que informé a John Brockman (ahora mi agente) sobre las ideas para este libro, me dio instrucciones muy precisas: «No quiero un libro de texto, quiero tu libro». Así que esta obra es una especie de autobiografía científica: aunque versa más sobre física que sobre mí, sin duda no encaja con la idea habitual de libro de divulgación científica que analiza la física de manera objetiva, que expone las ideas más aceptadas por la comunidad científica y que dedica un espacio idéntico a todos los puntos de vista contrapuestos. Este libro refleja mi búsqueda personal de la verdadera naturaleza de la realidad, y espero que la disfrute al verla a través de mis ojos. Juntos exploraremos las claves que considero más fascinantes, e intentaremos descifrar qué significa todo ello.

Empezaremos el viaje analizando la transformación que ha experimentado todo el contexto de la cuestión «¿Qué es la realidad?» a través de los hallazgos científicos más recientes con los que la física ha arrojado nueva luz sobre nuestra realidad exterior, desde las escalas más colosales (capítulos 2 a 6) hasta las más diminutas (capítulos 7 a 8). La parte I de este volumen indaga en el interrogante «¿Qué tamaño tiene este universo?» y persigue su respuesta definitiva viajando a escalas cósmicas cada vez mayores, estudiando tanto nuestros orígenes cósmicos como dos tipos de universos paralelos, buscando pistas de que el espacio es en cierto sentido matemático. La parte II del libro persigue implacable la pregunta «¿De qué está hecho todo?» a través de un viaje al microcosmos subatómico en el que examinaremos un tercer tipo de universo paralelo, y descubriremos signos de que los elementos constitutivos esenciales de la materia también son en cierto sentido matemáticos. En la parte III daremos un paso atrás y reflexionaremos sobre el significado que podría tener todo ello para la naturaleza última de la realidad. Empezaremos argumentando que nuestra incapacidad para comprender la consciencia no supone un obstáculo para el discernimiento íntegro de la realidad física exterior. A continuación ahondaremos en mi idea más extrema y controvertida: que la realidad última es puramente matemática, lo que relega conceptos tan habituales como la aleatoriedad, la complejidad y hasta el cambio a la categoría de meras ilusiones, e implica que existe un cuarto y

último nivel de universos paralelos. Concluiremos nuestro viaje en el capítulo 13 con la vuelta a nosotros, durante la cual exploraremos qué significa todo esto para las perspectivas de futuro de la vida en nuestro universo, para los humanos en general y para usted en particular. En la figura 1.3 encontrará el plan de viaje acompañado de mis consejos de lectura. ¡Nos aguarda un viaje fascinante! ¡Comencemos!



Lectores con curiosidad por la ciencia	Lectores compulsivos de divulgación científica	Físicos	Título del capítulo	Tema	Condición
1	1	1	¿Qué es la realidad?	Introducción	
2			Nuestro lugar en el espacio	¿Qué tamaño tiene el espacio?	Convencional
3			Nuestro lugar en el tiempo	Historia de este universo	Convencional
4			Nuestro universo en números	Cosmología de precisión	Convencional
5	5		Nuestros orígenes cósmicos	Inflación cósmica	Convencional
6	6	6	Bienvenidos al multiverso	Universos paralelos de niveles I y II	Controvertida
7			Legos cósmicos	Mecánica cuántica	Convencional
8	8	8	El multiverso del nivel III	Universos paralelos cuánticos	Controvertida
9	9	9	Realidad interior y exterior	El peso de la consciencia	Controvertida
10	10	10	Realidad física y matemática	La idea «la realidad es matemáticas»	Muy Controvertida
11	11	11	¿Es el tiempo una ilusión?	En busca de un sentido	Muy Controvertida
12	12	12	El multiverso del nivel IV	El multiverso superlativo	Muy Controvertida
13	13	13	La vida, este universo y todo	El futuro del universo y de la humanidad	Controvertida

Figura 1.3: Recomendaciones para leer este libro. Si ha leído gran cantidad de libros actuales de divulgación científica y cree saber qué son el espacio curvo, la Gran Explosión, el fondo cósmico de microondas, la energía oscura, la mecánica cuántica, etc., puede saltarse los capítulos 2, 3, 4 y 7 tras repasar los recuadros de «Sumario» que cierran cada uno de ellos. Y si ejerce usted dentro de la física profesional tal vez desee saltarse también el capítulo 5. Sin embargo, muchos conceptos que tal vez le resulten familiares implican unas sutilezas extraordinarias, y si no es capaz de responder todas las preguntas (de la 1 a la 16) que figuran en el capítulo 2, espero que también consulte el material inicial para comprobar que los últimos capítulos se basan en él siguiendo una lógica.

SUMARIO

- Creo que la lección más importante que nos ha enseñado la física sobre la naturaleza última de la realidad es que, sea lo que sea, es muy distinta de lo que parece.
- En la parte I de este libro abriremos el campo para explorar la realidad física en las escalas más grandes, desde los planetas hasta las estrellas, galaxias, supercúmulos, este universo y dos niveles posibles de universos paralelos.
- En la parte II del libro cerraremos el campo para explorar la realidad física a las escalas más pequeñas, desde los átomos hasta sus elementos constitutivos aún más elementales, lo que nos conducirá hasta un tercer nivel de universos paralelos.

- En la parte III daremos un paso atrás para explorar la naturaleza última de esta extraña realidad física e indagar en la posibilidad de que su esencia sea puramente matemática, en concreto una estructura matemática que forma parte de un cuarto y último nivel de universos paralelos.
- El término *realidad* significa muchas cosas distintas para personas diferentes. Yo empleo este vocablo para referirme a la naturaleza última del mundo físico exterior del que formamos parte, y desde que era niño siempre me ha inspirado y fascinado el empeño de entenderla mejor.
- Este libro trata sobre un viaje personal de indagación en la naturaleza de la realidad. ¡Anímese a acompañarme!

Primera parte
PERSPECTIVA MACRO

2
Nuestro lugar en el espacio

El espacio… es grande. Muy grande. Usted sencillamente se negará a creer lo enorme, lo inmensa, lo pasmosamente grande que es.

Douglas Adams,
en *Guía del autoestopista galáctico*[6]

Cuestiones cósmicas

Levanta la mano y le indico con un gesto que formule su pregunta. «¿El espacio sigue y sigue y no se acaba nunca?».

Pasmado estoy. ¡Guau! Acabo de concluir una pequeña charla sobre astronomía para el Kid's Corner («el Rincón de los Niños»), una actividad extraescolar de mi hijo en Winchester, y el tierno grupo de educación infantil que me observa sentado en el suelo con mirada inquisitiva aguarda una respuesta. Pero este pequeño de cinco años ¡me ha preguntado algo que no sé responder! En realidad es una cuestión que nadie en el planeta puede responder. Sin embargo, no se trata de una pregunta metafísica imposible, sino de un interrogante científico serio sobre el cual se han emitido predicciones firmes desde distintas teorías (que comentaré enseguida) y sobre el que están arrojando más luz experimentos que ahora están en marcha. De hecho, me parece una pregunta sensacional sobre la naturaleza de la realidad física que nos rodea (como veremos en el capítulo 5, esta cuestión nos conducirá a dos tipos diferentes de universos paralelos).

Con los años me he vuelto cada vez más misántropo con el seguimiento de las noticias del mundo, pero en unos segundos aquel infante me brindó una buena inyección de fe en el potencial de la humanidad. Si un pequeño de cinco años es capaz de decir cosas tan profundas, entonces ¡imagine lo que podemos llegar a hacer los adultos si trabajamos unidos en las circunstancias adecuadas! Aquel niño también me recordó la importancia de una enseñanza

de calidad. Todos nacemos con curiosidad pero, por lo común, en algún instante de nuestra formación el colegio consigue despojarnos de ella. Creo que mi mayor responsabilidad como docente no consiste en transmitir datos, sino en reavivar ese entusiasmo perdido por formular preguntas.

Me encantan las preguntas. Sobre todo las grandes preguntas. Me siento muy afortunado por poder dedicar gran parte de mi tiempo a abordar cuestiones interesantes. El hecho de que pueda llamar a eso trabajo y de que pueda vivir de ello es una suerte que sobrepasa con creces mis aspiraciones más ambiciosas. Esta es la lista de las dieciséis preguntas que me plantean con mayor frecuencia:

1. *¿Cómo es posible que el espacio no sea infinito?*
2. *¿Cómo pudo crearse un espacio infinito en un tiempo finito?*
3. *¿Hacia dónde se expande nuestro universo?*
4. *¿En qué lugar del cosmos se produjo la Gran Explosión?*
5. *¿Ocurrió la Gran Explosión en un solo punto?*
6. *Si este universo solo tiene catorce mil millones de años ¿cómo es que vemos objetos situados a treinta mil millones de años de distancia*
7. *¿No contradicen la teoría de la relatividad, las galaxias que se alejan con más rapidez que la velocidad de la luz?*
8. *¿De verdad se alejan las galaxias de nosotros, o es que el espacio se está expandiendo?*
9. *¿Se está expandiendo la galaxia?*
10. *¿Hay indicios de una singularidad en la Gran Explosión?*
11. *La creación mediante inflación de la materia que nos rodea a partir de prácticamente nada, ¿no contradice el principio de conservación de la energía?*
12. *¿Qué dio lugar a la Gran Explosión?*
13. *¿Qué había antes de la Gran Explosión?*
14. *¿Cuál es el destino último de este universo?*
15. *¿Qué son la materia y la energía oscuras?*
16. *¿Somos insignificantes?*

Indaguemos juntos en estos interrogantes. En los próximos cuatro capítulos responderemos a 11 de ellos y daremos un giro interesante a los otros cinco. Pero en primer lugar, retomemos la pregunta de aquel pequeño de cinco años, que constituirá un tema crucial a lo largo de toda esta primera parte del libro: *¿El espacio sigue y sigue y no se acaba nunca?*

El tamaño del cosmos

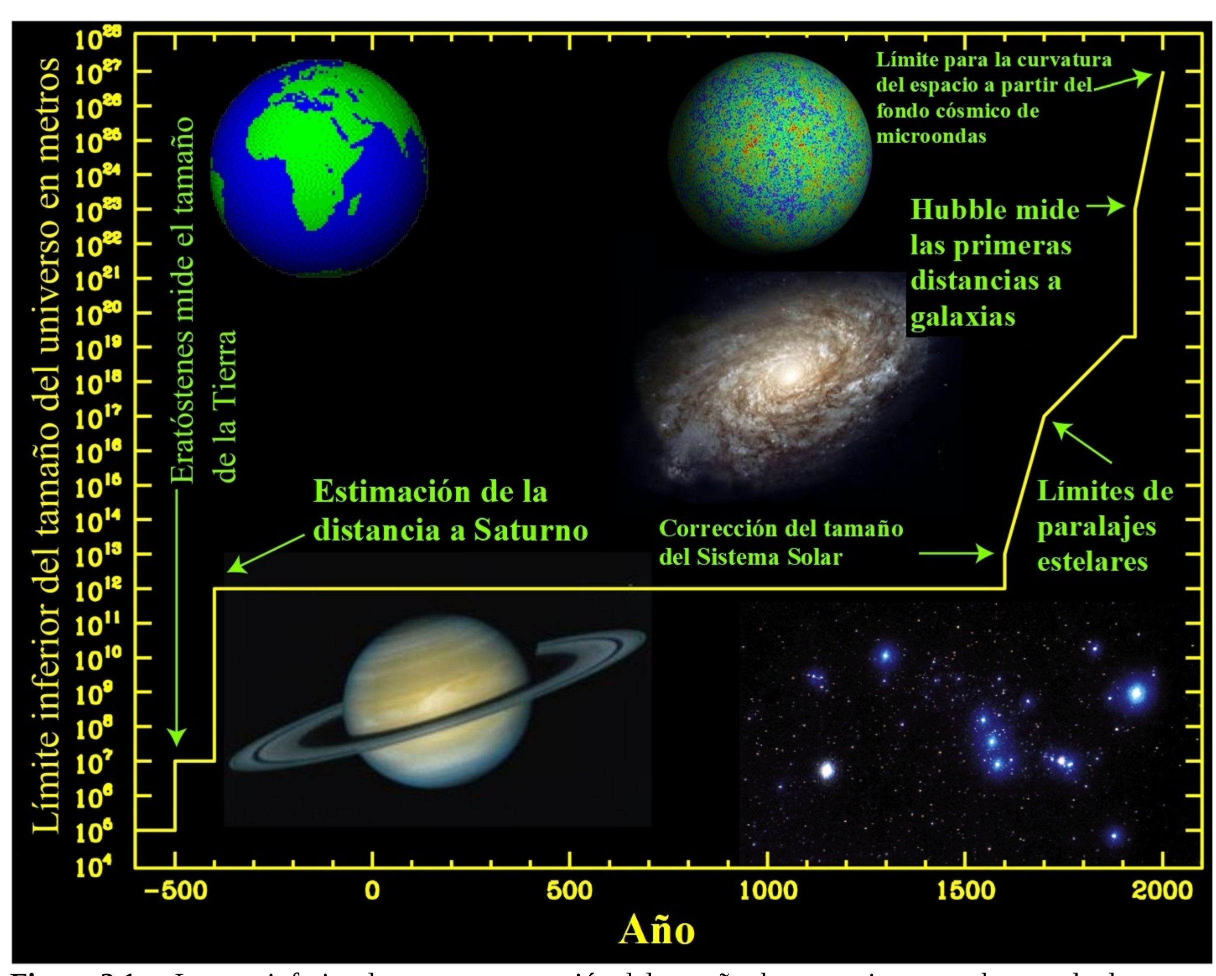


Figura 2.1: La cota inferior de nuestra percepción del tamaño de este universo no ha parado de crecer, tal como mostraremos en este capítulo. Nótese que la escala vertical es inmensa, ya que se multiplica por 10 en cada tramo.

En cierta ocasión mi padre me dio el siguiente consejo: «Si te encuentras ante una pregunta complicada que no eres capaz de responder, plantéate en primer lugar una pregunta más simple que sí puedas responder». Por tanto, empecemos preguntando cuál es el tamaño mínimo que debería tener el espacio para no contradecir las observaciones. La figura 2.1 ilustra que la respuesta a esta cuestión ha ido aumentando de manera espectacular con el paso de los siglos: ahora sabemos que el cosmos es como mínimo 1000 trillones (10^{21}) de veces mayor que las distancias más grandes conocidas por nuestros ancestros cazadores recolectores, que esencialmente se correspondían con la distancia que podían cubrir a pie a lo largo de una vida. Es más, la figura revela que esta ampliación de los horizontes humanos no ocurrió de golpe, sino que se ha ido produciendo de manera progresiva. Cada vez que los humanos hemos conseguido ampliar el campo de visión y

cartografiar este universo a escalas mayores, hemos descubierto que todo lo que conocíamos con anterioridad formaba parte de algo mayor. Tal como ilustra la figura 2.2, la tierra en la que nacimos forma parte de un planeta, que forma parte de un sistema planetario, que forma parte de una galaxia, que forma parte de un patrón cósmico de cúmulos de galaxias que forman parte del universo observable que, tal como defenderemos, forma parte de uno o más niveles de universos paralelos.

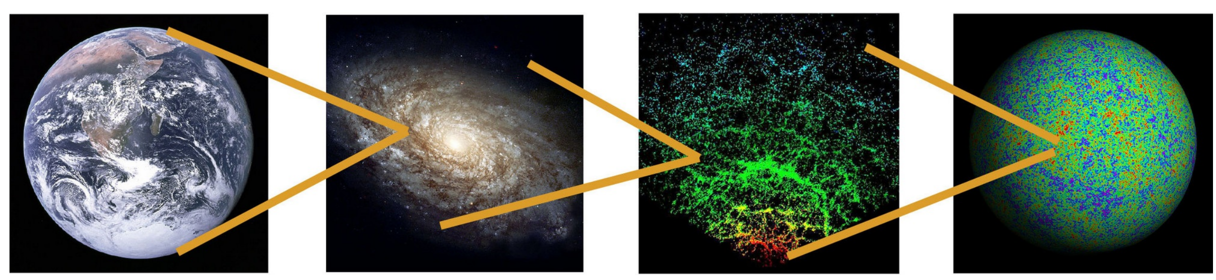


Figura 2.2: Cada vez que los humanos hemos conseguido ampliar el campo a escalas mayores, hemos descubierto que todo lo que conocíamos formaba parte de algo mayor: la tierra en la que nacimos forma parte de un planeta (izquierda), que forma parte de un sistema planetario, que forma parte de una galaxia (izquierda central), que forma parte de un patrón cósmico de cúmulos de galaxias (derecha central) que forman parte del universo observable (derecha), que podría formar parte de uno o más niveles de universos paralelos.

Como avestruces con la cabeza enterrada bajo tierra, los humanos hemos creído en reiteradas ocasiones que lo que veíamos era lo único existente, considerándonos con arrogancia el centro de todo. En nuestros intentos por entender el cosmos, la estimación a la baja ha sido, pues, un tema recurrente. Sin embargo, los datos de la figura 2.1 reflejan también un segundo tema que me parece interesante: *en repetidas ocasiones hemos infravalorado no solo el tamaño del cosmos, sino también la capacidad de la mente humana para comprenderlo*. Nuestros ancestros cavernícolas poseían cerebros igual de grandes que los nuestros y, como no se pasaban las veladas viendo la televisión, estoy convencido de que se planteaban preguntas como «¿qué será todo eso que hay en el cielo?» y «¿de dónde salió?». Les habían contado mitos y cuentos preciosos, pero apenas repararon en que tenían en su interior lo necesario para averiguar por sí mismos las respuestas a esas preguntas. Ni tampoco en que el secreto no estaba en aprender a volar hasta el espacio para estudiar los objetos celestes, sino en dejar volar sus mentes humanas.

No hay mayor garantía de fracaso que convencerse uno mismo de que el éxito es imposible y, por tanto, no llegar siquiera a intentar las cosas. Vistos en retrospectiva, muchos de los grandes avances de la física pudieron lograrse antes, porque ya existían las herramientas necesarias. Algo parecido en hockey sobre hielo sería desperdiciar un gol cantado por creer erróneamente

que llevas el palo roto. En los capítulos que siguen compartiré con usted ejemplos llamativos en los que faltas de confianza similares fueron superadas al fin por Isaac Newton, Aleksandr Fridman, George Gamow y Hugh Everett. Con ese espíritu resuena en mí esta cita del nobel de física Steven Weinberg: «Eso es lo habitual en física: el error no está en que nos tomemos nuestras teorías demasiado en serio, sino en que no nos las tomamos en serio lo suficiente».

Veamos en primer lugar cómo averiguar el tamaño de la Tierra y las distancias a la Luna, el Sol, las estrellas y las galaxias. Me parece una de las historias detectivescas más jugosas de todos los tiempos, y puede que hasta sea el origen de la ciencia moderna, así que estoy deseando compartirla con usted como aperitivo antes de pasar al plato fuerte: los últimos descubrimientos en cosmología. Como verá, los cuatro primeros ejemplos no implican nada más complicado que algunas mediciones de ángulos. Asimismo, desvelan la importancia de asombrarse ante observaciones aparentemente cotidianas, porque a veces contienen claves cruciales.

El tamaño de la Tierra

En cuanto se generalizó la navegación, la gente reparó en que cuando los barcos se alejaban por el horizonte, el casco desaparecía antes que las velas. Esto indujo a pensar que la superficie del océano es curva y que la Tierra es esférica, tal como parecían serlo también el Sol y la Luna. Los griegos de la antigüedad clásica también encontraron indicios directos de esto mismo al apreciar que la Tierra proyecta una sombra circular sobre la Luna durante los eclipses lunares, como se ve en la figura 2.3. Aunque sería fácil calcular el tamaño de la Tierra a partir del modo en que se ocultan los navíos tras el horizonte[7], Eratóstenes consiguió una medición mucho más precisa hace más de dos mil doscientos años mediante un empleo ingenioso de ángulos. Él sabía que el Sol luce totalmente vertical en la ciudad egipcia de Asuán a mediodía en el solsticio de verano, y sin embargo cae 7,2 grados al sur de la vertical en Alejandría, una ciudad situada 794 kilómetros más al norte. De ahí dedujo que recorrer 794 kilómetros equivale a cubrir 7,2 grados de los 360 grados que completan la circunferencia de la Tierra, de modo que la circunferencia completa tiene que medir unos 794 km × 360°/7,2° ≈ 39 700 km, lo cual se acerca notablemente a los 40 000 km que se le atribuyen en la actualidad.

Resulta irónico que Cristóbal Colón descartara este dato por completo y se fiara de cálculos ulteriores menos exactos, aparte de confundir millas árabes con millas italianas, lo cual lo llevó a la conclusión de que tan solo debía navegar 3700 km para llegar a Oriente, cuando el dato real ascendía a 19 600 km. Es evidente que no le habrían financiado el viaje si hubiera hecho bien los cálculos, y es evidente que no habría sobrevivido si América no existiera, así que a veces tener suerte es más importante que tener razón.

La distancia a la Luna

Los eclipses han inspirado temor, asombro y mitos a lo largo de todos los tiempos. De hecho, mientras Colón permaneció varado en Jamaica consiguió intimidar a los nativos con la predicción del eclipse lunar del 29 de febrero de 1504. Pero los eclipses lunares también dan una pista preciosa sobre el tamaño del cosmos. Hace más de dos milenios, Aristarco de Samos observó lo que verá con sus propios ojos en la figura 2.3: cuando la Tierra se sitúa entre el Sol y la Luna y se produce un eclipse lunar, la sombra que proyecta la Tierra sobre la Luna presenta un contorno curvo, y la sombra redondeada de la Tierra es varias veces mayor que la Luna. Aristarco también reparó en que esta sombra debe ser ligeramente menor que la propia Tierra debido a que la Tierra es menor que el Sol, y resolvió con tino esta complicación y concluyó que la Luna es unas 3,7 veces menor que la Tierra. Como Eratóstenes ya había calculado el tamaño de la Tierra, Aristarco se limitó a dividir ese dato entre 3,7 ¡para calcular el tamaño de la Luna! A mi entender, ese fue el momento en que la imaginación humana despegó al fin del suelo y empezó a conquistar el espacio. Infinidad de personas habían observado la Luna antes que Aristarco y se habían preguntado qué tamaño tendría, pero él fue el primero en calcularlo, y lo hizo aplicando el poder de la mente, no el poder de un cohete.

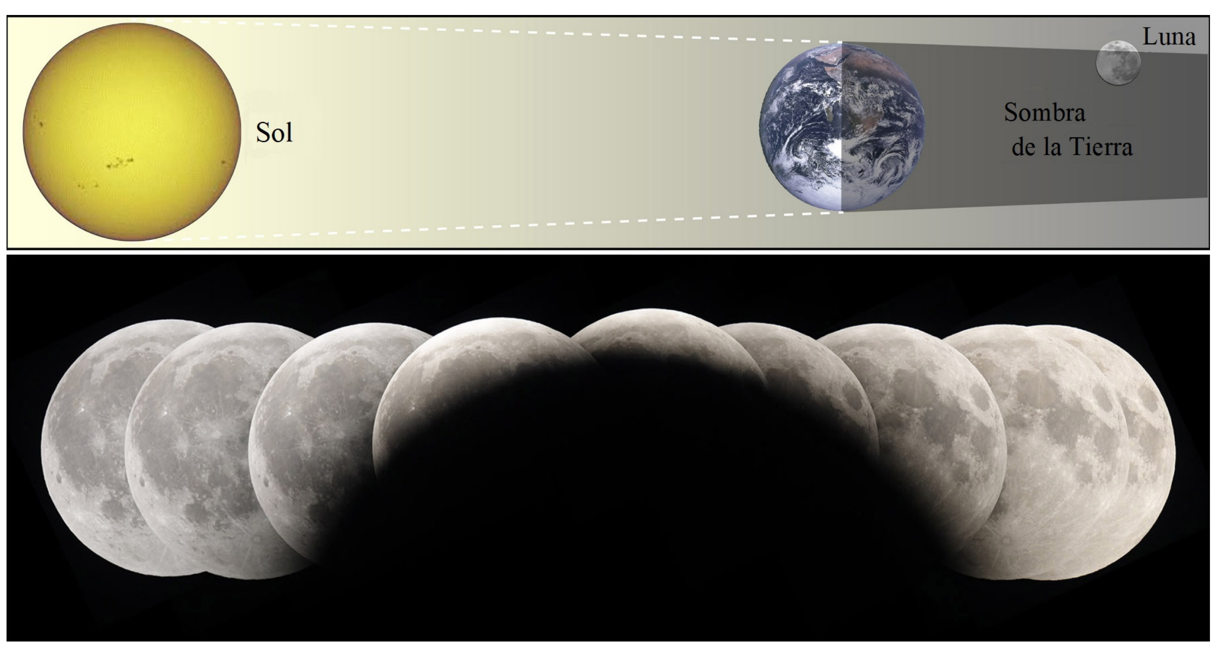


Figura 2.3: Durante los eclipses lunares, la Luna atraviesa la sombra que arroja la Tierra (tal como se ve arriba). Más de dos mil años atrás, Aristarco de Samos comparó el tamaño de la Luna con el tamaño de la sombra de la Tierra y dedujo con acierto que la Luna es unas cuatro veces menor que la Tierra. (*Secuencia fotográfica de Scott Ewart*).

Un hito científico suele propiciar otro y, en este caso, el tamaño de la Luna reveló de inmediato su distancia. Por favor, estire un brazo al frente con el meñique levantado y compruebe qué objetos de su alrededor quedan tapados por ese dedo. El meñique así extendido cubre un ángulo aproximado de un grado, lo que viene a ser el doble de lo que se necesita para tapar la Luna (no deje de comprobarlo la próxima vez que realice alguna observación lunar). Para que un objeto cubra medio grado, debe distar de nosotros alrededor de 115 veces su tamaño así que, si al mirar por la ventanilla de un avión tapa una piscina (olímpica) de 50 metros con la mitad del meñique, sabrá que viaja a una altitud de $115 \times 50\,\text{m} = 6\,\text{km}$. De la misma manera, Aristarco calculó que la distancia a la Luna debía ascender a 115 veces su tamaño, lo cual arrojó un resultado de unas 30 veces el diámetro de la Tierra.

La distancia al Sol y a los planetas

¿Y qué hay del Sol? Pruebe a tapar el Sol con el meñique y comprobará que abarca casi el mismo ángulo que la Luna, alrededor de medio grado, pero es evidente que se encuentra mucho más lejos que la Luna, puesto que esta lo oculta de la vista (de un modo casi exacto) durante los eclipses totales de Sol. Pero ¿cuánto más lejos? Pues depende del tamaño: por ejemplo, si midiera

tres veces más que la Luna, tendría que encontrarse tres veces más lejos para abarcar el mismo ángulo.

Aristarco de Samos estaba en racha de aciertos por entonces y también respondió con ingenio a este interrogante. Se dio cuenta de que el Sol, la Luna y la Tierra formaban los tres vértices de un triángulo rectángulo cuando la Luna está en una fase de cuarto, cuando vemos iluminada por el Sol justo la mitad de la cara de la Luna que mira hacia la Tierra (véase la figura 2.4), y calculó que el ángulo entre la Luna y el Sol rondaba los 87 grados en esos instantes. Así que, como conocía tanto la forma del triángulo como la longitud del lado Tierra-Luna, aplicó la trigonometría para calcular la longitud del lado Tierra-Sol, es decir, la distancia entre la Tierra y el Sol. Llegó a la conclusión de que el Sol dista unas 20 veces más que la Luna y, por tanto, es unas 20 veces mayor que la Luna. En otras palabras, el Sol era *inmenso*: con un diámetro más de cinco veces mayor que el de la Tierra. Este razonamiento animó a Aristarco a proponer la hipótesis heliocéntrica mucho antes que Nicolás Copérnico: pensó que tendría más sentido que fuera la Tierra la que orbitara alrededor del Sol, mucho más grande, y no al revés.

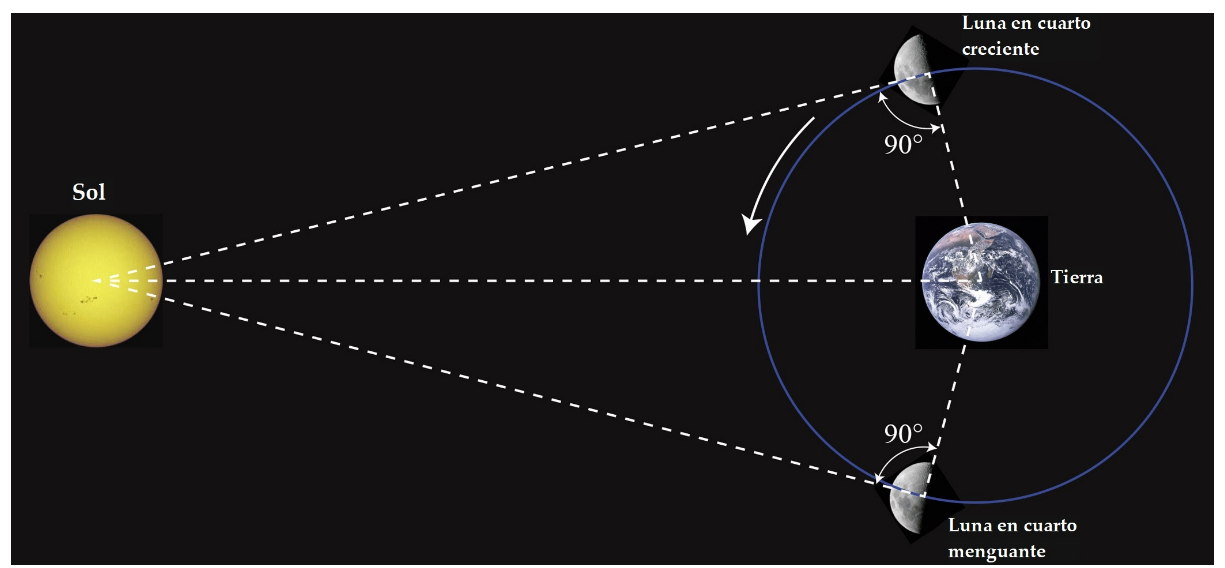


Figura 2.4: Midiendo el ángulo que formaban la Luna en fase de cuarto y el Sol, Aristarco logró estimar la distancia que nos separa del Sol. (Esta representación no está a escala; el tamaño del Sol supera en más de 100 veces el de la Tierra, y se encuentra unas 400 veces más lejos que la Luna).

Esta historia debe inspirarnos tanto como prevenirnos, porque enseña la importancia del ingenio y la importancia de valorar la incertidumbre de cada medición. Los griegos de la antigüedad eran menos dados a lo segundo, y Aristarco no fue, por desgracia, una excepción. Resulta que era muy complicado determinar en que instante preciso se ve iluminado justo el 50 % del disco de la Luna, y el verdadero ángulo Luna-Sol en ese momento no

asciende a 87 grados, sino a unos 89,85, muy cerca del ángulo recto. Por tanto, el triángulo de la figura 2.4 es en realidad mucho más alargado y fino: de hecho, el Sol dista casi 20 veces más de lo que estimó Aristarco, y tiene un diámetro unas 109 veces mayor que el de la Tierra, así que dentro del volumen del Sol cabrían un millón de planetas como el nuestro. Por desgracia, aquel error flagrante no se corrigió hasta casi dos mil años más tarde, así que cuando llegó Copérnico y estimó el tamaño y la forma del Sistema Solar con una destreza geométrica aún mayor, calculó bien la forma y el tamaño relativos de todas las órbitas planetarias, pero la escala global del Sistema Solar era unas 20 veces inferior a la real: algo equivalente a confundir una casa de verdad con una casa de muñecas.

La distancia a las estrellas

Pero ¿qué hay de las estrellas? ¿A qué distancia están? ¿Y qué son? Esta me parece una de las grandes historias detectivescas sobre un «caso abierto». El cálculo de la distancia a la Luna y el Sol fue impresionante, pero al menos se disponía de alguna información clave: experimentan cambios curiosos de posición y tienen formas y tamaños angulares medibles. ¡En cambio, una estrella parece un caso totalmente perdido! Se ve como un tenue punto blanco. Al observarla con más detenimiento… sigue viéndose como un tenue punto blanco, sin ninguna figura ni tamaño discernibles, nada más que un punto de luz. Y nunca notamos que las estrellas se muevan por el firmamento, salvo por la rotación global aparente de todas las constelaciones, la cual sabemos que es una mera ilusión debida a la rotación de la Tierra.

En la antigüedad hubo quien especuló con que las estrellas eran pequeños orificios en una esfera negra a través de los cuales pasaba luz distante. El astrónomo italiano Giordano Bruno propuso, en cambio, que eran objetos como el Sol, solo que mucho más alejados, y tal vez provistos de sus propios planetas y civilizaciones. Esto no fue muy bien recibido por la Iglesia católica, que ordenó quemarlo en la hoguera en el año 1600.

En 1608 llegó un atisbo inesperado de esperanza: ¡se inventó el telescopio! Galileo Galilei perfecciona enseguida el diseño, apunta a las estrellas con telescopios cada vez mejores y ve… de nuevo meros puntos blancos. Volvemos al principio. Conservo entrañables recuerdos de cuando de niño tocaba «*Twinkle, Twinkle, Little Star*» en el piano de mi abuela Signe. Hasta tiempos tan recientes como el año 1806, fecha en que se publicó por

primera vez esa canción, aún había mucha gente que se identificaba con la frase de esta canción que dice *«How I wonder what you are»* [«Cómo me intriga qué serás»], y nadie podía afirmar con sinceridad que supiera la respuesta.

Si las estrellas son de verdad soles distantes, tal como propuso Bruno, entonces tienen que hallarse a una distancia espectacular, mucho mayor que la del Sol, para verse tan tenues. Pero ¿cuánto más lejos que este? Pues eso depende de su luminosidad real, la cual también quisiéramos conocer. Treinta y dos años después de que se publicara la canción, el matemático y astrónomo alemán Friedrich Bessel consiguió al fin avanzar un paso en este caso detectivesco. Tenga la amabilidad de estirar el dedo pulgar con el brazo extendido y mirarlo de forma alterna y sin moverlo, primero con un ojo cerrado y después cerrando el otro. Pruebe a hacerlo varias veces. ¿Nota que el pulgar parece saltar cierto ángulo a un lado y al otro en relación con los objetos del fondo? Acérquese ahora el pulgar un poco más a la cara y comprobará que ese ángulo aumenta. Este salto recibe en astronomía el nombre de *paralaje*, y es evidente que se puede usar para calcular a qué distancia está el pulgar. En realidad, no tenemos que preocuparnos de realizar los cálculos, porque el cerebro los hace por nosotros con tanta facilidad que ni siquiera reparamos en ello (el hecho de que cada ojo vea los objetos desde un ángulo diferente dependiendo de la distancia a la que se encuentran constituye la esencia misma del funcionamiento del sistema que permite al cerebro percibir la profundidad para dotarnos de visión tridimensional).

Si tuviéramos los ojos más separados, percibiríamos mejor la profundidad a grandes distancias. En astronomía, este mismo efecto de paralaje nos permite simular que somos gigantes con ojos separados por 300 000 millones de metros, que es el diámetro de la órbita que sigue la Tierra alrededor del Sol. Esto se consigue obteniendo fotografías telescópicas con seis meses de diferencia temporal, cuando la Tierra se sitúa en lados opuestos del Sol. Haciendo esto, Bessel notó que, si bien la mayor parte de las estrellas aparecía en la misma posición en ambas imágenes, una estrella concreta no lo hacía: una estrella que portaba el enigmático nombre de 61 Cygni. Esta revelaba un pequeño desplazamiento angular que evidenciaba que tenía que hallarse casi un millón de veces más lejos que el Sol, una distancia tan descomunal que su luz tardaría once años en alcanzarnos, mientras que la luz del Sol nos llega en tan solo ocho minutos.

En cuestión de poco tiempo se midió la paralaje de muchas más estrellas, ¡una cantidad enorme de aquellos misteriosos puntos blancos tenía distancias

conocidas! Si observamos un coche que se aleja de nosotros por la noche, vemos que el brillo de las luces traseras decae con el inverso del cuadrado de la distancia (el doble de lejos las torna cuatro veces más tenues). Una vez conocida la distancia que nos separa de 61 Cygni, Bessel empleó esta ley del inverso de los cuadrados para calcular su luminosidad. La respuesta a la que llegó fue que tenía una luminosidad muy similar a la del Sol, lo que indicaba que ¡el pobre Giordano Bruno estaba en lo cierto después de todo!

Hacia la misma época se produjo un segundo avance crucial, en este caso a través de un planteamiento totalmente distinto. En 1814, el óptico alemán Joseph von Fraunhofer inventó un instrumento llamado *espectrógrafo*, que le permitió descomponer la luz blanca en los colores del arcoíris que la conforman, y medirlos con un detalle exquisito. Descubrió unas misteriosas líneas oscuras en el arcoíris (véase la figura 2.5) y que la posición específica que ocupaban esas líneas dentro del espectro de colores dependía de la composición de la fuente de luz, lo que las convertía en una especie de huella dactilar espectral. Durante las décadas siguientes se midieron y catalogaron esos espectros en muchos elementos comunes. Esta información se puede usar para ejecutar un truco fantástico durante alguna fiesta e impresionar a los amigos diciéndoles qué es lo que fulgura en sus lámparas mediante el mero análisis de la luz, sin siquiera acercarse a ellas. Fue sorprendente que el espectro de la luz solar revelara que el Sol, ese enigmático orbe ardiente suspendido del cielo, estuviera formado por elementos tan conocidos en la Tierra como el hidrógeno. Es más, cuando se observó la luz solar procedente de un telescopio a través de un espectroscopio, reveló que las estrellas ¡consisten casi en la misma mezcla de gases que el Sol! Esto terminó de resolver el asunto en favor de Bruno: las estrellas son soles distantes, semejantes tanto en producción energética como en contenido. Así que en pocas décadas las estrellas pasaron de ser puntos blancos inescrutables a convertirse en bolas gigantescas de gas caliente cuya composición química podía medirse.

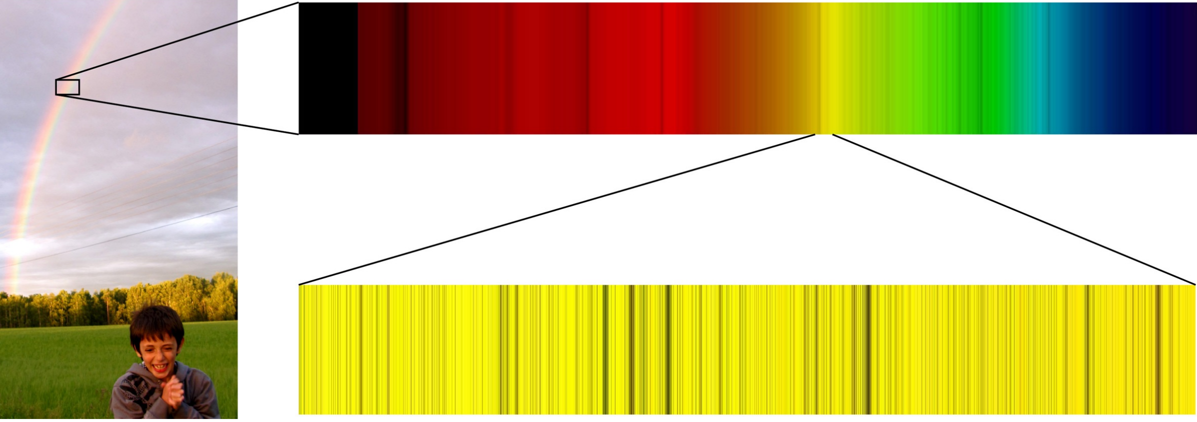


Figura 2.5: El arcoíris que contempla aquí mi hijo Alexander no conduce a un caldero lleno de oro, sino a una mina de información sobre el funcionamiento de los átomos y las estrellas. Tal como analizaremos en el capítulo 7, la intensidad relativa de cada color se explica porque la luz se compone de partículas (fotones), y la posición y la intensidad de las numerosas líneas oscuras se pueden calcular a partir de la ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica.

Un espectro es una mina de oro de información astronómica, y siempre que creemos haberla exprimido al máximo de su capacidad, encontramos claves nuevas codificadas en él. Para los principiantes, un espectro permite medir la temperatura de un objeto sin tocarlo con un termómetro. Sin necesidad de tocar, sabemos que un trozo de metal al rojo blanco está más caliente que otro al rojo vivo, y de forma similar sabemos que una estrella blanquecina es más caliente que una estrella rojiza; un espectrógrafo permite especificar las temperaturas con bastante precisión. Como sorpresa adicional, resulta que esta información revela también el tamaño del astro, igual que la resolución de una palabra en un crucigrama desvela en ocasiones otra palabra. El truco está en que la temperatura informa de la cantidad de luz que emerge de cada metro cuadrado de la superficie estelar. Como podemos calcular la cantidad total de luz que irradia la estrella (a partir de su distancia y brillo aparente), ya sabemos cuántos metros cuadrados debe tener la superficie del astro y, por tanto, qué tamaño tiene.

Por si fuera poco, el espectro de una estrella también oculta datos relevantes sobre su movimiento, el cual induce ligeras fluctuaciones de frecuencia (color) en su luz mediante el denominado efecto Doppler, el efecto que hace que decaiga el tono de ruido que despide un coche al pasar: la frecuencia es mayor cuando el coche se acerca y desciende a medida que se aleja. A diferencia del Sol, la mayoría de las estrellas mantienen una relación estable de pareja con una compañera estelar, y ambos miembros bailan uno alrededor del otro siguiendo una órbita regular. Esta danza se detecta a menudo a través del efecto Doppler, porque provoca que las líneas espectrales de las estrellas se muevan hacia atrás y hacia delante una vez por órbita. La

magnitud del desplazamiento revela la velocidad del movimiento, y mediante la observación de ambos astros a veces se puede medir cuánto distan entre sí. La combinación de toda esta información permite realizar un truco adicional: podemos pesar las estrellas sin colocarlas sobre una báscula de baño gigante, usando las leyes del movimiento y de la gravitación de Newton para calcular qué masa deben tener para seguir las órbitas observadas. En algunos casos, esos desplazamientos Doppler también han revelado planetas en órbita alrededor de una estrella. Si el planeta pasa por delante de la estrella, el ligero desvanecimiento del brillo estelar revela el tamaño del planeta, y la leve alteración de las líneas espectrales indica en ocasiones si el planeta posee atmósfera y de qué se compone. Y los espectros son un tesoro inagotable. Por ejemplo, la anchura de las líneas espectrales de una estrella con una temperatura determinada permite medir la presión gaseosa del astro, y el grado de división de las líneas espectrales en dos o más líneas próximas permite medir la intensidad del magnetismo en la superficie de la estrella.

En conclusión, la única información que tenemos sobre las estrellas se encuentra en la tenue luz que nos llega de ellas, pero inteligentes pesquisas detectivescas nos han permitido descifrar esa luz y traducirla en datos sobre su distancia, tamaño, masa, composición, temperatura, presión, magnetismo y sobre el sistema planetario que puedan hospedar. El hecho de que la mente humana haya inferido toda esa información a partir de puntos blancos en apariencia inescrutables es una proeza que creo que habría llenado de orgullo hasta a los grandes detectives Sherlock Holmes y Hercule Poirot.

La distancia a las galaxias

Cuando mi abuela Signe falleció a la edad de ciento dos años dediqué un tiempo a reflexionar sobre su vida, y descubrí que había crecido en un universo diferente al mío. Cuando se fue a estudiar a la universidad, el universo conocido consistía tan solo en el Sistema Solar y un enjambre de estrellas alrededor de él. Lo más probable es que tanto ella como sus amistades pensaran que estas estrellas se hallaban a distancias tan increíbles que su luz tardaba en llegarnos varios años desde las más próximas y miles de años en el caso de las más distantes que se conocían por entonces. Pero hoy en día contemplamos todo eso simplemente como nuestro patio cósmico.

Si había astrónomos en su facultad, habrían especulado sobre las llamadas *nebulosas*, objetos difusos con aspecto de nube en el firmamento nocturno,

algunos con preciosas formas espirales como las del famoso cuadro de Van Gogh titulado *Noche estrellada*. ¿Qué eran aquellas cosas? Muchos astrónomos las despreciaban por considerarlas insulsas nubes de gas entre las estrellas, pero algunos tenían una idea más radical sobre ellas: eran «universos isla», lo que en la actualidad denominamos *galaxias*, concentraciones enormes de estrellas tan lejanas que no llegan a verse de forma individual a través de los telescopios, sino que se muestran como una bruma nebulosa. Para resolver aquella controversia había que medir la distancia de algunas nebulosas, pero ¿cómo?

La técnica de la paralaje, que tan bien había funcionado con las estrellas cercanas, no servía para las nebulosas: estaban tan lejos que los ángulos de paralaje eran demasiado pequeños para apreciarlos. ¿De qué otra manera se pueden medir grandes distancias? Si observamos una bombilla lejana a través de un telescopio y vemos que en ella pone «100 vatios», ya está todo resuelto: basta con aplicar la ley del inverso de los cuadrados para calcular a qué distancia tiene que estar para lucir con ese brillo. Estos útiles objetos cósmicos de luminosidad conocida se denominan en astronomía *patrones de luminosidad*. Empleando las técnicas detectivescas comentadas más arriba se ha sabido que por desgracia las estrellas son cualquier cosa menos patrones, y algunas brillan un millón de veces más que el Sol, y otras 1000 veces menos. Sin embargo, si al observar una estrella pudiera leerse en ella algún letrero que pusiera «4×10^{26} vatios» (eso es lo que veríamos en la etiqueta del Sol), tendríamos un patrón de luminosidad y podríamos calcular su distancia igual que la de la bombilla. Por suerte, la naturaleza nos ha regalado una clase especial de estrellas útiles para esto, son las llamadas *variables cefeidas*. La luminosidad de estos astros fluctúa con el tiempo a medida que pulsan y cambian de tamaño, y la astrónoma de Harvard Henrietta Swan Leavitt descubrió en 1912 que el ritmo de la pulsación sirve como un vatímetro: cuantos más días transcurren entre dos pulsos sucesivos, más vatios de luz se irradian.

Estas estrellas cefeidas también tienen la ventaja de brillar lo bastante como para captarlas a vastas distancias (algunas llegan a brillar 100 000 veces más que el Sol), y el astrónomo estadounidense Edwin Hubble localizó varias de ellas en la llamada *nebulosa de Andrómeda* (una mancha borrosa del tamaño aparente de la Luna que se aprecia a simple vista en el firmamento desde lugares apartados de las luces urbanas). Hubble usó el telescopio *Hooker* de California (recién terminado por entonces y cuyo espejo de 2,5 metros era el mayor del mundo) para medir los ritmos de los pulsos, aplicó la

fórmula de Leavitt para calcular su luminosidad, comparó esos datos con el brillo aparente y calculó las distancias. Cuando comunicó los resultados durante un congreso en 1925 dejó a todos boquiabiertos: allí declaró que Andrómeda es una galaxia que dista de nosotros alrededor de un millón de años-luz, ¡1000 veces más lejana que la mayoría de las estrellas que mi abuela contemplaba de noche! Ahora sabemos que la galaxia de Andrómeda se halla a una distancia aún mayor que las estimaciones de Hubble, a unos tres millones de años-luz, de modo que, sin saberlo, Hubble continuó con la tradición de estimación a la baja que hemos practicado desde Aristarco y Copérnico.

Durante los años posteriores, Hubble y otros astrónomos siguieron descubriendo galaxias cada vez más distantes, y con ello ampliaron el horizonte de las distancias cósmicas de millones a miles de millones de años-luz, los cuales convertiremos en billones e incluso más en el capítulo 5.

¿Qué es el espacio?

Así que aquel pequeño de preescolar había preguntado: «¿El espacio sigue y sigue y no se acaba nunca?». Esta cuestión se puede abordar desde dos puntos de vista: el observacional y el teórico. En lo que llevamos de capítulo la hemos respondido desde la primera de esas perspectivas, comprobando que al aguzar el ingenio para realizar mediciones se nos revelan regiones cada vez más remotas del espacio, donde la vista se nos pierde sin fin. Sin embargo, también se ha avanzado mucho en el terreno teórico. En primer lugar, ¿cómo podría suceder que el espacio *no* siguiera sin fin? Tal como manifesté a aquellos infantes, sería rarísimo que nos topáramos con un cartel como el de la figura 2.6, donde se nos dice que hemos llegado al final del espacio. Me recuerdo meditando sobre esto cuando era niño: ¿qué habría entonces más allá del cartel? A mí me parecía que preocuparse por si llegamos a los confines del espacio es tan absurdo como la inquietud que sentían los marinos de la antigüedad ante la posibilidad de llegar a los confines de la Tierra. Así que concluía que el espacio sencillamente tenía que seguir y seguir, y ser infinito por pura lógica. De hecho, recurriendo al pensamiento lógico en la antigua Grecia, Euclides reparó en que la geometría era en realidad matemáticas, y que el espacio tridimensional infinito podía describirse con el mismo rigor que otras estructuras matemáticas, como los conjuntos de números. Él desarrolló esta preciosa teoría matemática sobre el espacio tridimensional

infinito y sus características geométricas, y esta visión pasó a contemplarse en general como la única forma de ser posible, desde un punto de vista lógico, de nuestro espacio físico.

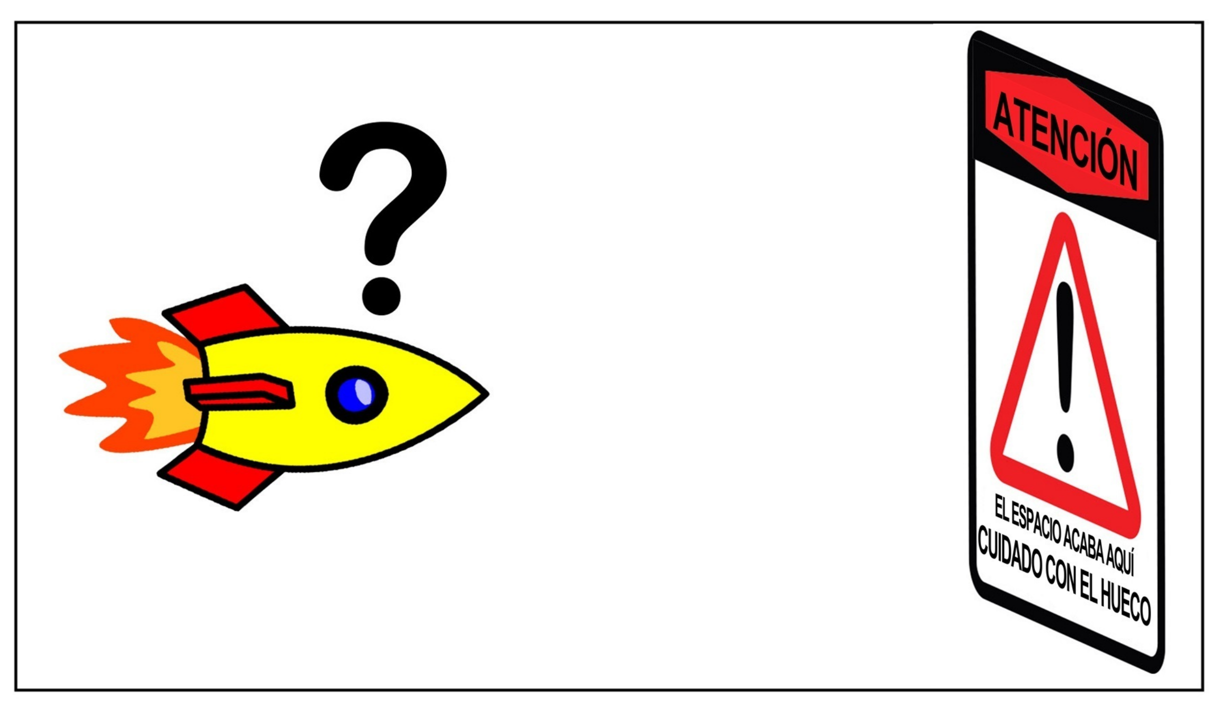


Figura 2.6: Cuesta imaginar de qué modo podría ser finito el espacio. Si tuviera un fin ¿qué habría más allá de él?

En cambio, en el siglo XIX, los matemáticos Carl Friedrich Gauss, János Bolyai y Nikolái Lobachevski descubrieron que existían otras posibilidades lógicas para el espacio tridimensional uniforme, y Bolyai escribió entusiasmado a su padre: «De la nada he creado un extraño universo nuevo». Esos espacios nuevos obedecen a leyes distintas: por ejemplo, ya no tienen que ser infinitos, tal como los concibe el espacio euclídeo, y los ángulos de un triángulo ya no tienen que sumar 180 grados tal como estipula la fórmula de Euclides. Imagine que trazamos un triángulo sobre cada una de las superficies bidimensionales de los objetos tridimensionales de la figura 2.7: esos tres ángulos sumarán más de 180 grados en el caso de la esfera (izquierda), 180 grados justos en el cilindro (centro), y menos de 180 grados en el hiperboloide (derecha). Es más, la superficie bidimensional de la esfera es finita aunque carezca de cualquier clase de borde.

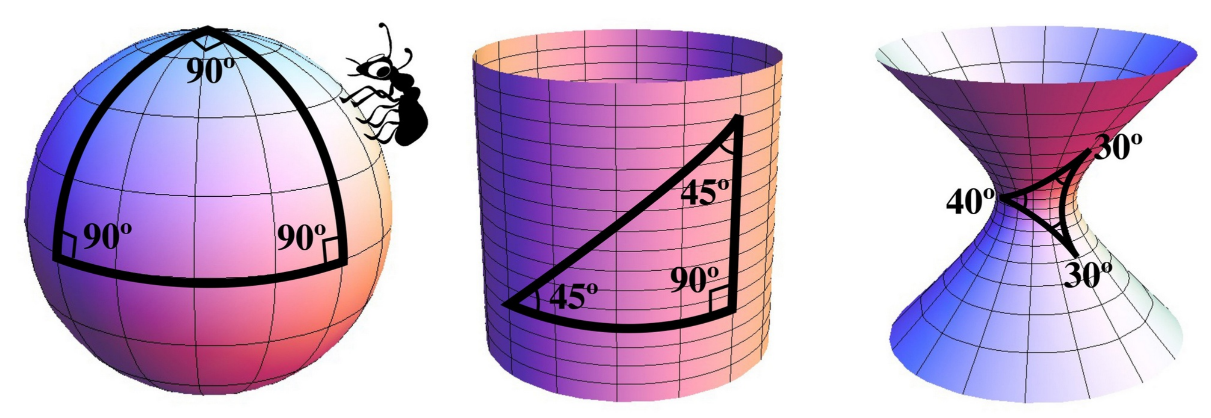


Figura 2.7: Si trazamos triángulos sobre estas superficies, sus ángulos sumarán más de 180 grados (izquierda), 180 grados justos (centro) y menos de 180 grados (derecha), respectivamente. Einstein nos enseñó que estas tres opciones también son posibles en triángulos de nuestro propio espacio físico tridimensional.

Este ejemplo evidencia que algunas superficies que no son planas rompen con las reglas de la geometría de Euclides. En cambio, Gauss y los demás tenían una visión aún más extrema: ¡un espacio puede estar curvado sobre sí mismo, aun cuando no sea la superficie de nada! Supongamos que somos hormigas ciegas y que queremos averiguar sobre cuál de las tres superficies de la figura 2.7 estamos andando. Notamos que, en efecto, moramos en un espacio bidimensional porque no tenemos acceso a la tercera dimensión (fuera de la superficie), pero eso no frustra nuestra labor detectivesca: aún podemos definir una línea recta como el recorrido más corto entre dos puntos, así que bastará con sumar los tres ángulos de un triángulo. Si, por ejemplo, el cálculo da un total de 270 grados, exclamaremos: «¡Ajá, suman más de 180 grados, así que vivimos sobre la esfera!». Y si queremos impresionar todavía más a nuestras amistades formícidas, hasta podemos calcular cuánto habría que caminar en línea recta para regresar al punto de partida. En otras palabras, todo el entramado geométrico habitual de puntos, líneas, ángulos, curvaturas, etc., se puede definir con rigor haciendo referencia únicamente a lo que hay en el espacio bidimensional, sin aludir en absoluto a una tercera dimensión. Esto significa que los matemáticos pueden definir con rigor una superficie bidimensional curva incluso aunque no exista una tercera dimensión: un espacio bidimensional curvado sobre sí mismo, que no es la superficie de nada.

Seguramente, el hallazgo matemático de los espacios no euclídeos significó para la mayoría de la gente poco más que una abstracción matemática esotérica sin ninguna relevancia práctica para nuestro mundo físico. Pero entonces apareció Einstein con su teoría de la relatividad general, que en efecto proclama: «¡Somos las hormigas!». La teoría de Einstein

permite que nuestro espacio tridimensional sea curvo, incluso sin que albergue en su interior ninguna cuarta dimensión dentro de la que curvarse. Así que la cuestión de qué clase de espacio habitamos *no se puede* responder tan solo con pura lógica, tal como esperaban algunos entusiastas de Euclides. Únicamente se puede solucionar mediante mediciones, como trazando un triángulo inmenso en el espacio (cuyos lados fueran, por ejemplo, rayos de luz) y comprobando si sus ángulos suman 180 grados. En el capítulo 4 contaré lo mucho que nos divertimos mis colegas y yo haciendo justamente eso; el resultado obtenido arroja unos 180 grados para triángulos del tamaño del universo, pero bastante más de 180 grados si buena parte del triángulo está ocupada por una estrella de neutrones o un agujero negro, así que la forma de nuestro espacio físico es más compleja que las tres opciones sencillas ilustradas en la figura 2.7.

Retomando la pregunta del niño de preescolar, vemos que la teoría de Einstein permite que el espacio sea finito de un modo no tan bobo como en la figura 2.6: puede ser finito siendo curvo. Por ejemplo, si el espacio tridimensional fuera curvo como la superficie de una hiperesfera tetradimensional, entonces, al viajar tan lejos como quisiéramos en línea recta, acabaríamos llegando al punto de partida por el lado opuesto. No nos caeríamos por el borde del espacio tridimensional porque carece de bordes, del mismo modo que la hormiga de la figura 2.7 no se topa con ningún confín al deambular sobre la esfera.

Es más, Einstein permite que el espacio tridimensional sea finito ¡incluso sin ser curvo! El cilindro de la figura 2.7 es plano en lugar de curvo desde un punto de vista matemático: si trazamos un triángulo sobre un cilindro de papel, sus ángulos sumarán 180 grados. Para comprobarlo, basta con recortar el triángulo con un par de tijeras, y ver que se queda plano al extenderlo sobre una mesa; esto no se podría hacer con una esfera o un hiperboloide de papel sin romper o deformar la hoja. Sin embargo, aunque el cilindro de la figura 2.7 le parecería plano a una hormiga que caminara por una pequeña región de él, el cilindro está plegado sobre sí mismo: la hormiga regresará al punto de partida si sigue una trayectoria horizontal en línea recta. Los matemáticos llaman *topología* a la conectividad de un espacio. Han definido espacios planos que enlazan consigo mismos en *todas* sus dimensiones, y les han dado el nombre de *toro*. Un toro bidimensional tiene la misma topología que la superficie de una rosquilla tradicional (con un agujero en el centro). Einstein permite la posibilidad de que el espacio físico en el que habitamos

sea un toro tridimensional, en cuyo caso sería a la par plano y finito. Pero también podría ser infinito.

En resumen, el espacio en el que vivimos podría ser infinito y podría no serlo. Ambas posibilidades son perfectamente razonables de acuerdo con la mejor teoría disponible sobre la naturaleza del espacio, la relatividad general de Einstein. Entonces, ¿cómo es en realidad? Regresaremos a este enigma fascinante en los capítulos 4 y 5, donde encontraremos indicios de que el espacio es verdaderamente infinito después de todo. Pero la búsqueda de una respuesta a la profunda pregunta de aquel pequeño conduce a otra: ¿Qué *es* el espacio en realidad? Aunque todos comenzamos la vida considerando el espacio como algo *físico* que conforma el tejido básico de nuestro mundo material, ahora vemos que los matemáticos hablan de los espacios como objetos *matemáticos*. Para ellos, el estudio del espacio equivale a estudiar geometría, y la geometría no es más que una parte de las matemáticas. De hecho, podríamos afirmar que el espacio es un objeto matemático, en el sentido de que sus únicas propiedades intrínsecas son propiedades matemáticas, propiedades como la dimensionalidad, la curvatura y la topología. Llevaremos este razonamiento mucho más lejos en el capítulo 10, defendiendo que en un sentido bien definido, toda nuestra realidad física es un objeto puramente matemático.

Hemos dedicado este capítulo a analizar qué lugar ocupamos dentro del espacio, lo que nos ha desvelado un universo mucho mayor que el que percibieron nuestros ancestros. Para comprender de verdad qué ocurre en las distancias más lejanas observables con telescopio, sin embargo, no basta con considerar tan solo nuestro lugar dentro del espacio, también hay que explorar nuestro lugar dentro del tiempo. Ese será nuestro grito de guerra en el próximo capítulo.

SUMARIO

- Una vez tras otra, los humanos hemos ido reparando en que nuestra realidad física es mucho más grande de lo que habíamos imaginado, y que todo lo que conocíamos formaba parte de una estructura aún mayor: un planeta, un sistema planetario, una galaxia, un supercúmulo de galaxias, etc.
- La teoría de la relatividad general de Einstein admite la posibilidad de que el espacio sea infinito.
- Pero también admite la opción alternativa de que el espacio sea finito y carezca de un confín, de forma que si pudiéramos viajar lo bastante

lejos y deprisa, regresaríamos al punto de partida por el lado opuesto.

- El mismísimo tejido de nuestro mundo físico, el espacio, podría ser un objeto puramente matemático en el sentido de que sus únicas propiedades intrínsecas son propiedades matemáticas, números tales como la dimensionalidad, la curvatura y la topología.

3
Nuestro lugar en el tiempo

La verdadera sabiduría es conocer la extensión de la propia ignorancia.

Confucio

La mayor forma de ignorancia se produce cuando rechazamos algo sobre lo que no sabemos nada.

Wayne Dyer

¿De dónde salió el Sistema Solar? Mi hijo Philip se enzarzó en una acalorada discusión sobre este asunto en segundo de primaria que transcurrió más o menos así:

«Yo creo que lo hizo Dios», dice una niña de su clase.

«Pero mi padre dice que se formó a partir de una nube molecular gigante», intervino Philip.

«Y ¿de dónde salió esa nube molecular gigante?», preguntó otro niño.

«A lo mejor Dios creó la nube molecular gigante, y después la nube molecular gigante formó el Sistema Solar», respondió la niña.

Apostaría a que desde que los humanos deambulan por la Tierra, han contemplado el firmamento nocturno y se han preguntado de dónde salió todo eso. Sabemos mucho sobre el aquí y el ahora, y también sabemos bastante sobre sucesos próximos en el espacio y en el tiempo, como qué hay justo detrás de nosotros y qué comimos para desayunar. A medida que nos alejamos en el espacio y en el tiempo acabamos topándonos con la frontera de nuestro conocimiento, allí donde empieza nuestra ignorancia. En el capítulo anterior vimos que la inventiva humana fue ampliando gradualmente esa frontera del conocimiento en el *espacio*, lo que expandió el terreno de lo conocido hasta incorporar todo nuestro planeta, el Sistema Solar, la Galaxia y hasta miles de millones de años-luz de espacio en todas direcciones. Enviemos ahora una segunda expedición intelectual para explorar cómo hemos ampliado los humanos poco a poco esa frontera en el *tiempo*.

¿Por qué no se cae la Luna? La respuesta a este interrogante desencadenó la primera ofensiva.

¿De dónde salió el Sistema Solar?

Hace tan solo cuatrocientos años esta pregunta aún parecía irresoluble. Ya hemos visto que el trabajo detectivesco ingenioso reveló la posición de los objetos clave apreciables a simple vista: el Sol, la Luna, Mercurio, Venus, Marte, Saturno y Júpiter. Las diligentes pesquisas de Nicolás Copérnico, Tycho Brahe, Johannes Kepler y otros también desentrañaron los movimientos de esos objetos: se descubrió que el Sistema Solar se parecía a un mecanismo de relojería cuyas partes se desplazan siguiendo órbitas precisas que se repiten una y otra vez, al parecer eternas. No había ningún signo en absoluto de que el mecanismo acabaría parándose algún día, ni de que hubiera comenzado a funcionar en algún instante particular en el pasado. Pero ¿de verdad era eterno? Y si no lo era, ¿de dónde había salido? Aún no teníamos ninguna pista.

Los movimientos de los engranajes, los muelles y otras piezas de los mecanismos de relojería que se comercializaban en la época se regían por unas leyes tan bien conocidas que podían hacerse predicciones tanto sobre el futuro como sobre el pasado. Podía predecirse que un reloj seguiría funcionando a un ritmo constante, y también que, debido al rozamiento, acabaría parándose si no se le daba cuerda. Un estudio detenido permitía concluir que alguien había tenido que darle cuerda, por decir algo, durante el último mes. Si existieran leyes más o menos igual de precisas que describieran y explicaran los movimientos celestes, ¿implicarían también ellas algunos efectos debidos al rozamiento que a la larga alterarían el Sistema Solar y que también darían pistas sobre cuándo y cómo se formó?

La respuesta parecía ser un *no* rotundo. Aquí en la Tierra habíamos llegado a entender bastante bien cómo se mueven las cosas por el espacio, desde las piedras lanzadas al aire y las rocas catapultadas por los romanos hasta las bolas de hierro disparadas con cañones. Pero las leyes que regían los movimientos celestes parecían distintas de las que gobernaban las cosas en el suelo. Por ejemplo, ¿qué decir de la Luna? Si es alguna suerte de roca gigante suspendida en el cielo, ¿por qué no se cae como hacen las rocas normales? La respuesta clásica era que la Luna era un objeto celeste y los objetos celestes sencillamente se rigen por leyes diferentes. Como, por ejemplo, ser inmunes a

la gravedad y no caer. Algunos se atrevieron a ir más lejos y ofrecer una explicación: los objetos celestes son así porque son perfectos. Tienen formas perfectamente esféricas porque la esfera es la figura geométrica perfecta; siguen órbitas circulares porque las circunferencias también son perfectas; y caer sería lo menos perfecto que hay. En la Tierra abunda la imperfección: el rozamiento frena las cosas, el fuego las consume y las personas mueren. En el cielo, en cambio, los movimientos parecen libres de rozamiento, el Sol no se consume y no hay horizontes para la mirada.

Esta fama de perfección de todo lo celeste no resistía, sin embargo, un examen más detallado. Al analizar las mediciones de Tycho Brahe, Johannes Kepler comprobó que los movimientos planetarios no siguen circunferencias, sino elipses, que son versiones alargadas del círculo y, según se decía, menos perfectas. A través de sus telescopios, Galileo observó que la perfección del Sol estaba empañada por unas manchas negras abominables, y que la Luna no era una esfera perfecta, sino algo que parecía un *lugar* provisto de montañas y cráteres gigantes. Entonces, ¿por qué no se caía?

Isaac Newton respondió al fin esta pregunta indagando en una idea tan simple como rompedora: los objetos celestes obedecen a las *mismas* leyes que los objetos que hay aquí en la Tierra. Desde luego, la Luna no se cae como una piedra lanzada al aire, pero ¿sería posible lanzar una piedra corriente de tal forma que tampoco llegara a caer? Newton sabía que las piedras terrestres se caen al suelo, en lugar caer hacia un objeto mucho más masivo como es el Sol, y llegó a la conclusión de que esto tenía que deberse a que el Sol reside mucho más lejos y de que la atracción gravitatoria de un objeto disminuye con la distancia. Entonces, ¿era posible lanzar una piedra hacia arriba con tanta velocidad que lograra escapar del tirón gravitatorio que ejerce la Tierra antes de que este tirón tuviera tiempo de invertir el desplazamiento de la piedra? Newton no podía hacerlo por sí mismo, pero se dio cuenta de que un supercañón hipotético sí podría obrar el prodigio, siempre que consiguiera imprimir a la piedra una velocidad suficiente. Tal como se aprecia en la figura 3.1, esto significa que el destino final de una bala de cañón disparada en horizontal depende de la velocidad: se estampa contra el suelo únicamente cuando lleva una velocidad inferior a cierto límite mágico. Si disparamos proyectiles a velocidades cada vez mayores, recorrerán más y más trecho antes de aterrizar, hasta que llegue un momento en que alcancemos esa velocidad mágica en la que la altura sobre el suelo se mantiene constante y nunca lleguen a caer, de forma que se limiten a orbitar la Tierra en círculo, ¡igual que la Luna! Como Newton conocía la intensidad de la fuerza de la

gravedad en las proximidades de la superficie terrestre a través de experimentos con la caída de piedras, manzanas, etc., logró calcular que tal velocidad mágica ascendía al pasmoso valor de 7,9 kilómetros por segundo. Dando por supuesto que la Luna obedecía a las mismas leyes que una bala de cañón, predijo de forma parecida qué velocidad debía tener para seguir una órbita circular; lo único que faltaba era una regla para saber cuánto más débil era la gravitación de la Tierra en el lugar donde se encuentra la Luna. Es más, como la Luna tarda un mes en completar un círculo cuya circunferencia ya había calculado Aristarco, Newton ya conocía su velocidad: alrededor de un kilómetro por segundo, la misma que el proyectil disparado por un fusil M16. Pero él hizo ahora un descubrimiento notable: si admitía que la fuerza gravitatoria desciende con el inverso del cuadrado de la distancia desde el centro de la Tierra, la velocidad mágica que imprimiría a la Luna una órbita circular ¡coincidía con exactitud con la velocidad medida! Había descubierto la ley de la gravitación y se encontró con que era universal, y que no era aplicable tan solo aquí en la Tierra, sino también en el cielo.

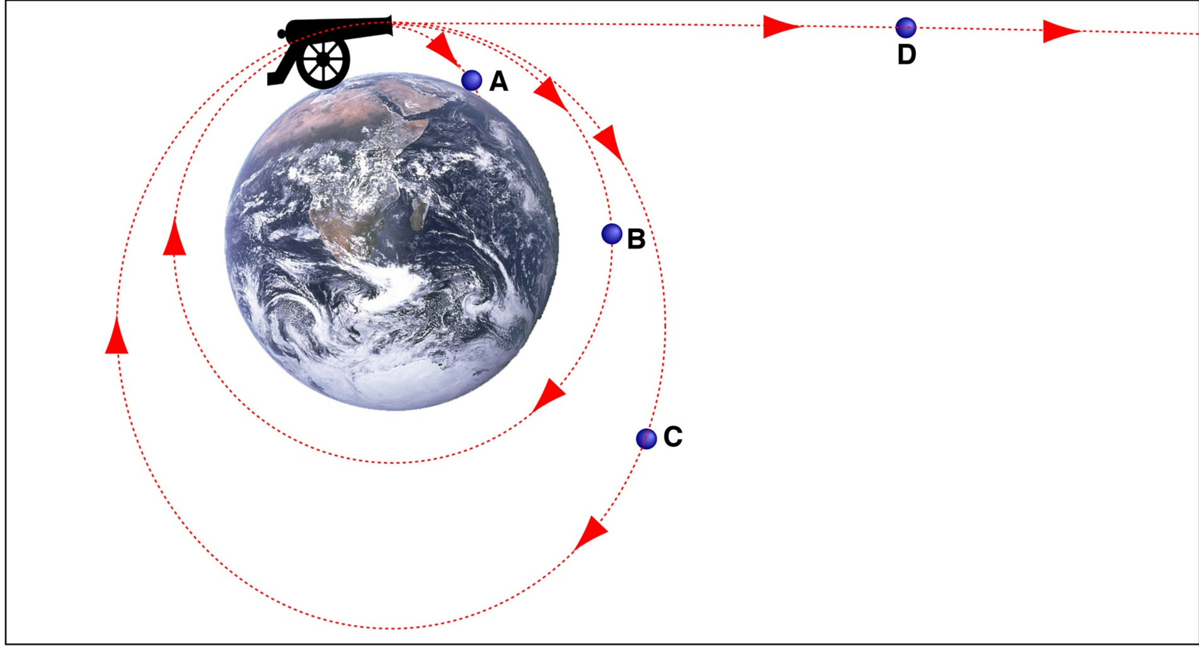


Figura 3.1: Una bala de cañón (*D*) disparada con una velocidad superior a 11,2 kilómetros por segundo escapa de la Tierra para no regresar jamás (sin tener en cuenta la resistencia del aire). Si se lanza con una velocidad un poco inferior (*C*), se sitúa en cambio en una órbita elíptica alrededor de la Tierra. Si se dispara en horizontal a 7,9 kilómetros por segundo (*B*), se situará en una órbita perfectamente circular, y si se lanza con velocidades inferiores (*A*), acabará estampándose contra el suelo.

De repente, las piezas del rompecabezas empezaron a encajar en su lugar. Al combinar esta ley de la gravitación con leyes matemáticas del movimiento formuladas por él mismo, Newton consiguió explicar, no ya el movimiento de

la Luna, sino también los movimientos de los planetas alrededor del Sol: Newton incluso llegó a inferir de forma matemática el hecho de que las órbitas generales fueran elipses en lugar de circunferencias, lo que para Kepler no pasó de ser un hecho misterioso, inexplicable.

Tal como sucede con la mayoría de los grandes avances en física, las leyes de Newton respondían muchas más preguntas que las que impulsaron el descubrimiento. Por ejemplo, explicaban las mareas: el tirón gravitatorio que ejercen la Luna y el Sol es mayor en las masas de agua próximas a ellos, lo que hace que el agua se desplace a medida que la Tierra rota. Las leyes de Newton también revelaron que la cantidad total de energía se conserva (en física el término *conservado* se usa en el sentido de «preservado» e «inalterado»), así que si aparece energía en algún lugar, no pudo ser creada a partir de la nada, sino que tiene que provenir de algún otro sitio. Las mareas disipan gran cantidad de energía (parte de la cual se recupera a través de centrales eléctricas de marea), pero ¿de dónde procede toda esa energía? En buena medida de la rotación de la Tierra, la cual se frena con el rozamiento de marea: si en algún momento le parece que el día no tiene suficientes horas, espere doscientos millones de años ¡y los días durarán entonces veinticinco horas!

Esto significa que el rozamiento afecta incluso a los movimientos planetarios, lo que anula la idea de un Sistema Solar eterno: la Tierra tuvo que girar más rápidamente en el pasado y podemos calcular que el sistema Tierra-Luna en su estado actual no puede datar de hace más de cuatro mil o cinco mil millones de años, porque en cualquier otro caso la Tierra habría girado tan deprisa que las fuerzas centrífugas la habrían destrozado. Por último, un primer dato clave sobre el origen del Sistema Solar: ¡tenemos una estimación para la fecha del crimen!

El hallazgo de Newton facultó a la mente humana para la conquista del espacio: puso de manifiesto en primer lugar que se podían descifrar leyes físicas a través de la experimentación aquí en la Tierra y, a continuación, que cabía extrapolar esas leyes para explicar qué estaba sucediendo en el cielo. Aunque en un primer momento Newton solo aplicó esta idea al movimiento y la gravitación, el concepto se propagó como el fuego, y de manera gradual se fue aplicando a otras materias, como la luz, los gases, los líquidos, los sólidos, la electricidad y el magnetismo. La gente la extrapoló con valentía no solo al macrocosmos del espacio, sino también al microcosmos, y fue así como se descubrió que muchas propiedades de los gases y otras sustancias se explicaban aplicando las leyes del movimiento de Newton a los átomos que

las conforman. La revolución científica había comenzado. Dio paso tanto a la revolución industrial como a la era de la información. Este logro permitió, a su vez, crear potentes computadoras que favorecieron el avance de la ciencia al resolver ecuaciones físicas y calcular las respuestas de numerosos interrogantes físicos interesantes que con anterioridad nos tenían perplejos.

Las leyes de la física se pueden usar de diversas maneras. A menudo empleamos el conocimiento presente para predecir el futuro, como en los pronósticos del tiempo. Sin embargo, las ecuaciones se pueden resolver igual de bien a la inversa, usando el conocimiento presente para deducir el pasado (como la reconstrucción de los detalles exactos del eclipse que presenció Colón en Jamaica). Un tercer modo consiste en imaginar una situación hipotética y emplear las ecuaciones físicas para calcular cómo cambiará con el tiempo (como cuando se simula el lanzamiento de un cohete con destino a Marte y se calcula si llegará al destino deseado). Este tercer enfoque ha aportado más pistas sobre el origen del Sistema Solar.

Imagine una gran nube de gas en el espacio exterior: ¿qué le pasará con el paso del tiempo? Las leyes de la física predicen una pugna entre dos fuerzas que determinará su futuro: la gravitación tenderá a comprimirla, mientras que la presión tenderá a disgregarla. Si la gravitación empieza a tomar la delantera y a comprimir la nube, esta se calentará (por eso la bomba de aire de la bici se calienta al usarla) y eso, a su vez, aumentará la presión, lo que detiene el avance de la gravitación. La nube tal vez permanezca estable durante un periodo prolongado de tiempo mientras la gravitación y la presión se equilibren entre sí, aunque la frágil tregua está condenada al fracaso. Como la nube está caliente, el gas que contiene fulgura e irradia hacia fuera parte de la energía calorífica que le aporta la presión. Esto permite a la gravitación comprimir la nube aún más, y así sucesivamente. Si se introducen las leyes de la gravitación y de la física de gases en una computadora, se consiguen simulaciones detalladas de esta batalla hipotética para ver qué sucede. A la larga, la parte más densa de la nube alcanza una temperatura y una densidad tan elevadas que se convierte en un reactor de fusión: los átomos de hidrógeno se funden en helio, mientras que la intensa atracción gravitatoria impide que todo ello salte por los aires en pedazos. Ha nacido una estrella. Las regiones externas de la estrella emergente están lo bastante calientes como para brillar con intensidad, esa luz estelar empieza a dispersar el resto de la nube de gas, y el astro recién nacido se torna visible a través de telescopios.

Rebobinado. Repetición. A medida que la nube de gas experimenta una contracción gradual, cualquier rotación ligera de la nube se amplifica igual que al practicar patinaje sobre hielo se gira más deprisa si se pegan los brazos al cuerpo. Las fuerzas centrífugas procedentes de esta rotación cada vez más veloz impiden que la gravitación aplaste la nube de gas hasta convertirla en un mero punto y, en lugar de eso, la comprime hasta conferirle la forma de una pizza, como cuando el pizzero de mi antiguo colegio de primaria hacía girar la masa en el aire para aplanarla. Los ingredientes principales de todas estas pizzas cósmicas los constituyen el gas hidrógeno y el gas helio, pero si la lista de ingredientes contiene también átomos más pesados, como carbono, oxígeno y silicio, entonces mientras en el centro de esta pizza de gas se forma una estrella, las regiones de la periferia a veces se agrupan y dan lugar a otros objetos más fríos, *planetas*, que se tornan manifiestos cuando la estrella recién nacida aventa el resto de la masa de la pizza. Como todo el movimiento giratorio (o el *momento angular*, tal como lo llamamos en física) proviene de la rotación de la nube original, no es de extrañar que todos los planetas del Sistema Solar orbiten alrededor del Sol siguiendo la misma dirección (en sentido antihorario si se mira hacia abajo desde el polo norte), que coincide asimismo con la dirección en la que rota el propio Sol a un ritmo aproximado de una vez al mes.

Esta explicación de los orígenes del Sistema Solar ya no se basa tan solo en cálculos teóricos, sino también en observaciones telescópicas de muchos otros sistemas solares «sorprendidos in fraganti» en distintas fases del proceso de gestación. La Galaxia contiene cantidades ingentes de nubes moleculares gigantes, nubes de gas formadas por moléculas cuyas propiedades favorecen que irradien el calor al exterior, que se enfríen y contraigan, y en muchas de ellas se observa el nacimiento de estrellas nuevas. En algunos casos hasta se ven estrellas recién nacidas rodeadas por los discos protoplanetarios de gas en forma de pizza aún bastante intactos. El descubrimiento reciente de gran cantidad de sistemas planetarios alrededor de otras estrellas ha aportado a la astronomía una profusión de datos nuevos para refinar la explicación de cómo se formó nuestro propio Sistema Solar.

Si este proceso de gestación fue *lo que* dio lugar al Sistema Solar, ¿*cuándo* ocurrió exactamente? Hace tan solo un siglo aún se creía que el Sol se tuvo que formar hace veinte millones de años porque, si esperáramos mucho más, la pérdida de energía irradiada en forma de luz solar habría hecho que la gravitación comprimiera el Sol hasta conferirle un tamaño mucho menor del observado. De manera parecida, se calculó que si se atribuyera al

sistema una edad mucho mayor que esa, la mayoría del calor interno de la Tierra (que se manifiesta en forma de volcanes y chimeneas geotermales) se habría disipado por completo.

El misterio de qué es lo que mantiene caliente al Sol no se resolvió hasta la década de 1930, cuando se descubrió la fusión nuclear. Pero antes de eso, el hallazgo en 1896 de la radiactividad tumbó las viejas estimaciones de la edad de la Tierra y aportó, además, un método excelente para realizar otras mejores. El isótopo más común de los átomos de uranio decae de forma espontánea en torio y otros átomos más ligeros a un ritmo tal que la mitad de los átomos se descompone al cabo de cuatro mil cuatrocientos setenta millones de años. Estas desintegraciones radiactivas generan suficiente calor como para mantener el núcleo de la Tierra a la temperatura necesaria durante miles de millones de años, lo cual explica por qué la Tierra es tan cálida aunque tenga una edad muy superior a veinte millones de años. Es más, al medir qué fracción de los átomos de uranio de una roca se ha desintegrado, se puede establecer la edad de esa roca, y se han encontrado algunas rocas de la zona de Jack Hills en el oeste de Australia con más de cuatro mil cuatrocientos cuatro millones de años. La edad máxima de los meteoritos estudiados es de cuatro mil quinientos sesenta millones de años, lo que induce a pensar que tanto nuestro planeta como el resto del Sistema Solar se formaron hace unos cuatro mil quinientos millones de años atrás (lo que concuerda a la perfección con las estimaciones más groseras a partir de las mareas).

En resumen, el descubrimiento y la aplicación de las leyes físicas ha aportado a los humanos una respuesta cualitativa y cuantitativa para una de las preguntas más profundas de nuestros ancestros: *¿Cómo y cuándo se formó el Sistema Solar?*

¿De dónde salieron las galaxias?

Así que hemos replegado las fronteras del conocimiento humano hasta cuatro mil quinientos millones de años atrás, el momento en que se formó el Sistema Solar mediante la contracción gravitatoria de una nube molecular gigante. Pero, tal como planteó la compañera de clase de Philip: *¿De dónde salió esa nube molecular gigante?*

La formación de las galaxias

Armada de telescopios, lápices y computadoras, la comunidad astronómica ha encontrado asimismo una solución convincente para este misterio, aunque aún quedan detalles importantes por esclarecer. En esencia la misma batalla librada entre la gravitación y la presión que formó nuestro Sistema Solar con estructura de pizza se repite a una escala mayor, comprime una región mucho más grande, entre millones y billones de veces más pesada que el Sol, y le confiere esa misma forma de pizza. Este colapso es bastante inestable, por eso no da lugar a un sistema solar a lo bestia con una sola megaestrella rodeada por megaplanetas. En lugar de eso, se fragmenta en innumerables nubes menores de gas que forman sistemas solares aislados: por tanto, ha nacido una galaxia. Nuestro Sistema Solar es uno más de los cientos de miles de millones que residen en una galaxia en forma de pizza, la Galaxia, y completa una órbita alrededor de su centro desde una distancia intermedia una vez cada doscientos millones de años (véase la figura 2.2).

En ocasiones, las galaxias colisionan entre sí en descomunales accidentes cósmicos de circulación. El resultado no es tan desastroso como parece, porque la mayoría de las estrellas que las conforman consiguen esquivarse unas a otras; al final, la gravitación funde la mayoría de esos astros en una nueva galaxia aún mayor. Tanto la Galaxia como nuestra vecina cósmica más grande, Andrómeda, tienen forma de pizza y se denominan galaxias espirales debido a la bella estructura de brazos espirales que exhiben, tal como se ve en la figura 2.2. Cuando chocan dos galaxias espirales, el resultado tiene un aspecto muy desordenado en un principio, pero después se estabiliza en una mancha redondeada de estrellas que se conoce como galaxia elíptica. Ese es el destino que nos aguarda, puesto que nos encaminamos hacia una colisión con Andrómeda que se producirá dentro de varios miles de millones de años. Desconocemos si nuestros descendientes llamarán a su hogar «Galaxómeda», pero estamos seguros de que será una galaxia elíptica porque los telescopios nos han revelado muchas otras colisiones parecidas en distintas fases de formación, y los resultados coinciden con nuestras predicciones teóricas.

Si las galaxias actuales se formaron a partir de la combinación de otras más pequeñas, ¿qué tamaño tuvieron las primeras? Este empeño en replegar las fronteras del conocimiento humano hasta épocas cada vez más remotas fue el tema del primer proyecto de investigación en el que me quedé atascado de verdad. Una parte clave de mi trabajo consistía en calcular de qué manera las reacciones químicas en el gas producen moléculas que a su vez pueden reducir la presión gaseosa mediante la irradiación de energía calorífica al exterior. Pero cada vez que creía que había concluido los cálculos, descubría

que las fórmulas moleculares que había usado adolecían de errores graves, lo que anulaba todas mis conclusiones y me obligaba a empezar de nuevo. Cuatro años después de que mi director de tesis de grado, Joe Silk, me metiera en aquello por primera vez, mi frustración era tal que había pensado en imprimirme una camiseta diseñada por mí con el lema «odio las moléculas» junto a mi mayor pesadilla, la molécula de hidrógeno, atravesada por una gran banda roja como las que aparecen en las señales de «prohibido fumar». Pero entonces intervino la fortuna: al mudarme a Múnich para realizar una estancia posdoctoral, me topé con un amable estudiante de grado llamado Tom Abel que acababa de terminar el cálculo verdaderamente enciclopédico de todas las fórmulas moleculares que yo necesitaba. Se unió a nuestro equipo de coautores, y veinticuatro horas después habíamos acabado. Llegamos a la conclusión de que las primerísimas galaxias «solo» pesaban alrededor de un millón de veces lo que pesa el Sol; tuvimos suerte porque aquel hallazgo concuerda en esencia con las simulaciones por computadora mucho más sofisticadas que está desarrollando Tom hoy en día como profesor en Stanford.

Nuestro universo podría estar expandiéndose

Como hemos visto, el gran teatro del planeta Tierra (la sucesión de una generación tras otra de organismos que nacen, interaccionan y mueren) comenzó unos cuatro mil quinientos millones de años atrás. Es más, hemos descubierto que todo eso forma parte de una obra de teatro mucho mayor en la que una generación tras otra de galaxias nace, interacciona y a la larga perece dentro de algo así como un ecosistema cósmico. Entonces, ¿podría existir un tercer nivel dentro de esta dramaturgia en el que se formen y extingan incluso universos? En concreto, ¿hay algún indicio de que nuestro propio universo tuviera alguna suerte de comienzo? Y en ese caso, ¿cómo y cuándo ocurrió?

¿Por qué no se desmoronan las galaxias? La respuesta a esta pregunta desencadenó el siguiente repliegue más atrás en el tiempo de las fronteras del conocimiento humano. Ya hemos visto que la Luna no se cae porque órbita a nuestro alrededor a gran velocidad. Nuestro universo está repleto de galaxias en todas direcciones, y es bastante obvio que para ellas no sirve la misma explicación. No todas orbitan a nuestro alrededor. Si este universo fuera eterno y esencialmente estático, lo que implicaría un desplazamiento mínimo de las galaxias distantes, entonces ¿por qué no acaban precipitándose hacia

nosotros como lo haría la Luna si la detuviéramos en su órbita, la mantuviéramos quieta y la dejáramos caer?

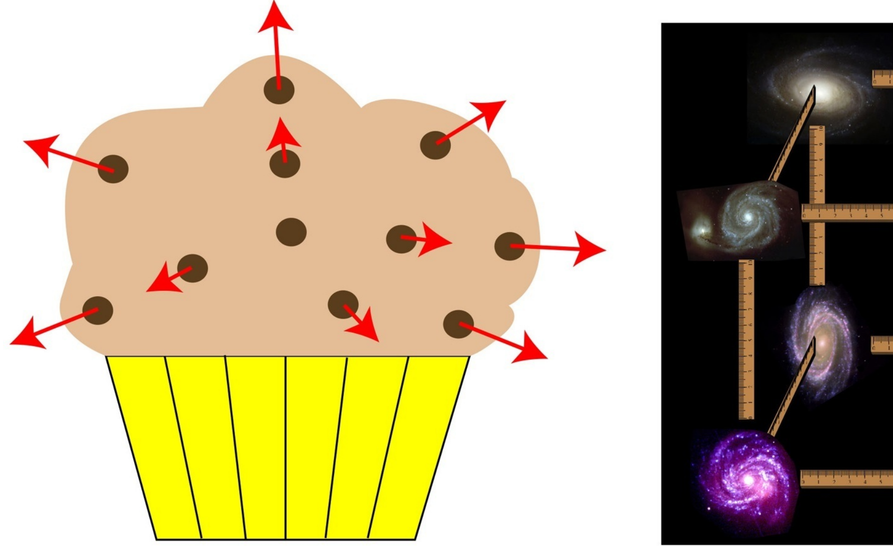
En la época de Newton la gente, por supuesto, no conocía las galaxias. Pero si, al igual que Giordano Bruno, contemplaba un universo estático, infinito y uniformemente lleno de estrellas, al menos había una mala excusa para no preocuparse por que se les cayeran en la cabeza: las leyes de Newton indicaban que cada estrella soporta una fuerza intensa (de hecho, infinita) que tira de ella en todas y cada una de las direcciones, por tanto se podía esgrimir que estas fuerzas opuestas se cancelaban unas a otras y mantenían todas las estrellas quietas en su posición.

En 1915, aquella excusa quedó refutada por la nueva teoría de la gravitación de Albert Einstein, la teoría general de la relatividad. El mismo Einstein reparó en que un universo estático, infinito y uniformemente lleno de materia no concordaba con las nuevas ecuaciones de la gravitación. ¿Qué hizo entonces? Sin duda había aprendido la principal lección de Newton consistente en atreverse a extrapolar, a calcular qué clase de universo *sí* encajaba en sus ecuaciones para, a continuación, buscar observaciones que demostraran si residimos en un universo así. Considero una ironía que hasta Einstein, uno de los científicos más originales de todos los tiempos, cuya seña de identidad consistió en el cuestionamiento de las afirmaciones y las autoridades incuestionables, no llegara a cuestionarse la autoridad más importante de todas: a sí mismo y su idea preconcebida de que vivimos en un universo eterno e inmutable. En lugar de eso, modificó sus ecuaciones (lo que más tarde calificó como su mayor error) incorporando un término adicional que permitía que este universo fuera estático y eterno. Como ironía doble, ahora parece que ese término adicional existe de verdad en forma de energía cósmica oscura (de la que hablaremos más adelante), pero con un valor diferente que no confiere estatismo a nuestro universo.

La persona que al fin tuvo el aplomo y la capacidad para escuchar el mensaje de las ecuaciones de Einstein fue el físico y matemático soviético Aleksandr Fridman. Él las resolvió para el caso más general de todos, para un universo uniformemente lleno de materia, y descubrió algo impactante: ¡la mayoría de las soluciones *no* eran estáticas, sino que cambiaban con el tiempo! La solución estática de Einstein no solo era una excepción dentro del comportamiento habitual, sino que era inestable, así que un universo casi estático no podía mantenerse por mucho tiempo. Del mismo modo que la producción de Newton reveló que el estado natural del Sistema Solar es que permanezca en movimiento (la Tierra y la Luna no pueden limitarse a

quedarse quietas eternamente), el trabajo de Fridman reveló que el estado natural de todo nuestro universo es que se mantenga en movimiento.

Pero ¿qué clase de movimiento en concreto? Fridman descubrió que lo más natural es que residamos en un universo que, o bien se esté *expandiendo* o bien se esté *contrayendo*. Si se estuviera expandiendo significaría que todos los objetos distantes se están alejando entre sí, como pepitas de chocolate dentro de una magdalena que aumenta en el horno (figura 3.2). En tal caso, todo tuvo que encontrarse más cerca en el pasado. De hecho, en las soluciones más simples de Fridman para un universo en expansión, hubo un tiempo específico en el pasado en el que todo lo que observamos hoy estuvo en un mismo lugar y formó una densidad infinita. En otras palabras, nuestro universo tuvo un comienzo, y ese nacimiento cósmico consistió en el estallido cataclísmico de algo infinitamente denso. Había nacido la Gran Explosión o *Big Bang*.



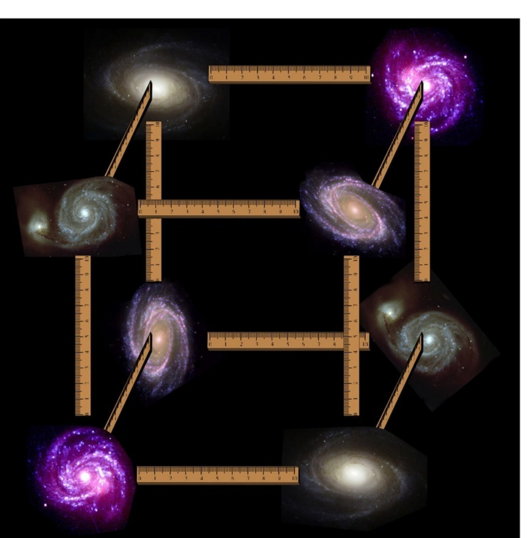


Figura 3.2: Las galaxias distantes se alejan unas de otras como las pepitas de chocolate de una magdalena que sube en el horno (izquierda): desde el lugar que ocupa cada una de ellas, todas las demás se alejan en línea recta a una velocidad proporcional a su distancia. Pero si imaginamos que el espacio se estira igual que la masa de la magdalena, entonces las galaxias no se mueven en relación con el espacio, y lo único que sucede es que el espacio estira de manera uniforme todas sus distancias (derecha), como si las marcas de una regla dejaran de considerarse milímetros y pasaran a llamarse centímetros.

La respuesta a la Gran Explosión de Fridman fue un silencio ensordecedor. Aunque su artículo se publicó en una de las revistas de física más prestigiosas de Alemania, y generó un debate entre Einstein y otros, acabó siendo largamente ignorado y no ejerció ningún impacto en absoluto en la cosmovisión imperante en la época. Ignorar las grandes ideas constituye una

tradición inveterada en cosmología (y, de hecho, en toda la ciencia en general): ya hemos hablado del heliocentrismo de Aristarco y de los sistemas solares lejanos de Giordano Bruno, y encontraremos muchos ejemplos más en las páginas y capítulos que tenemos por delante. En el caso de Fridman, creo que parte del motivo de que lo ignoraran fue que se adelantó a su tiempo: en 1922, el universo conocido se limitaba a nuestra Galaxia (en realidad, tan solo a la pequeña porción que vemos de ella), y la Galaxia *no* se está expandiendo, así que los cientos de miles de millones de estrellas que la conforman permanecen quietos en sus órbitas en virtud de su atracción gravitatoria.

Esta es la respuesta a la novena pregunta de la lista que figura en el capítulo anterior: ¿Se está expandiendo la Galaxia? La expansión de Fridman solo es aplicable a escalas tan grandes que podemos ignorar la concentración de la materia en galaxias y en cúmulos de galaxias. En la figura 2.2 se aprecia que la distribución de las galaxias se vuelve bastante regular y uniforme a escalas enormes, como cien millones de años-luz, lo que implica que las soluciones de universo homogéneo de Fridman encajan con la realidad, y que todas las galaxias situadas a distancias tan grandes deberían estar alejándose unas de otras. Pero, tal como comentamos con anterioridad, hasta 1925 (¡tres años después!) ni siquiera se sabía que *existen* las galaxias, un hallazgo de Hubble con el que al fin maduraron los tiempos para Fridman. Pero, por desgracia, también a él le había llegado la hora: falleció de fiebre tifoidea ese mismo año, a la temprana edad de treinta y siete años.

Para mí, Fridman es uno de los grandes héroes olvidados de la cosmología. Mientras escribía estas líneas no pude resistirme a leer su artículo original de 1922, y vi que termina con un ejemplo fascinante de un universo descomunal con una masa equivalente a la de cinco quintillones de soles al que le calcula una duración aproximada de diez mil millones de años, una aproximación similar al valor aceptado en la actualidad para la edad de nuestro universo. No explica de dónde dedujo eso años antes de que se descubrieran las galaxias, pero sin duda era un final perfecto para un artículo eminente escrito por una eminencia.

Nuestro universo se está expandiendo

Cinco años después, la historia volvió a repetirse: un estudiante de posgrado del MIT, el sacerdote y astrofísico Georges Lemaître, volvió a publicar la solución de la Gran Explosión que había planteado Fridman, la cual desconocía y había redescubierto. Y, una vez más, volvió a ser ignorada por la mayoría de la comunidad científica.

Lo que al fin animó a la gente a tener en cuenta la Gran Explosión no fueron nuevos trabajos teóricos, sino la toma de datos nuevos. Ahora que Edwin Hubble había constatado la existencia de las galaxias, el siguiente paso obvio para él consistió en empezar a cartografiar su distribución y su desplazamiento por el espacio. Tal como dije en el capítulo anterior, a menudo resulta sencillo medir a qué velocidad se acerca o aleja algo de nosotros, puesto que el movimiento desplaza las líneas en el espectro de la luz. La luz roja tiene la frecuencia más baja de todos los colores del arcoíris, así que si una galaxia se aleja de nosotros, los colores de todas sus líneas espectrales presentarán un *desplazamiento al rojo*, una desviación hacia colores más rojos, y cuanto más deprisa se mueva, mayor será esa desviación. Si la galaxia se acerca a nosotros, sus colores aparecerán, en cambio, *desplazados hacia el azul*, hacia frecuencias más altas.

Si las galaxias siguieran sencillamente movimientos aleatorios, lo esperable sería que alrededor de la mitad revelara un desplazamiento hacia el rojo y el resto, un desplazamiento hacia el azul. La sorpresa llegó cuando Hubble descubrió que casi todas las galaxias que había estudiado presentaban un desplazamiento hacia el rojo. ¿Por qué todas se alejaban de nosotros? ¿Es que no les gustábamos? ¿Habíamos dicho algo inapropiado? Es más, Hubble descubrió que cuanto mayor era la distancia d de la galaxia, mayor era la velocidad v a la que se alejaba de nosotros, de acuerdo con la fórmula

$$v = Hd$$

conocida en la actualidad como *ley de Hubble*. Aquí la H se corresponde con el denominado parámetro de Hubble, cantidad a la que este llamó modestamente K en el artículo pionero que publicó sobre este tema en 1929 para no resultar demasiado prepotente. Curiosamente, Georges Lemaître había revelado en su ignorado artículo de 1927 que la solución del universo en expansión *predecía* la ley de Hubble: si todo se estaba separando de todo lo demás, también veríamos que las galaxias distantes se separan de nosotros.

Si una galaxia se aleja en línea recta de nosotros, eso indica que en el pasado se encontraba muy cerca. ¿Cuánto tiempo atrás? Si vemos un coche alejarse deprisa tras del robo de un banco, podemos calcular cuánto tiempo hace que salió del lugar dividiendo la distancia entre la velocidad. Si hacemos lo mismo con las galaxias que se alejan de nosotros, la ley de Hubble da una respuesta idéntica, $d/v = 1/H$ ¡para todas ellas! Y esa respuesta es $1/H \approx$ catorce mil millones de años empleando mediciones modernas, así que el

hallazgo de Hubble indica que unos catorce mil millones de años atrás sucedió algo bastante impactante con un montón de materia concentrada en una densidad enorme. Para obtener una respuesta más exacta hay que considerar en qué medida el coche/universo ha acelerado/frenado/avanzado a una velocidad constante desde que abandonó la escena del delito. Cuando tenemos eso en cuenta hoy usando las ecuaciones de Fridman y mediciones modernas, encontramos que la corrección necesaria es bastante pequeña a un nivel porcentual: después de la Gran Explosión, nuestro universo pasó alrededor de la mitad del tiempo frenándose, y el resto del tiempo acelerándose, así que las correcciones casi se anulan entre sí.

El sentido de un universo en expansión

Tras el anuncio de las mediciones de Hubble hasta Einstein se convenció, y ahora la versión oficial es que nuestro universo se está expandiendo. Pero ¿qué *significa* que nuestro universo se está expandiendo? Ya estamos listos para abordar cuatro interrogantes más de los que conforman la lista del comienzo del capítulo 2.

En primer lugar, *¿de verdad se alejan las galaxias de nosotros, o es que el espacio se está expandiendo?* Resulta muy oportuno que la teoría de la gravitación de Einstein (la relatividad general) afirme que esos son dos puntos de vista equivalentes e igualmente válidos, tal como ilustra la figura 3.2, así que es usted libre de pensar sobre ello de la manera que le resulte más intuitiva[8]. Desde el primer punto de vista, no es que el espacio esté cambiando, sino que son las galaxias las que se mueven por el espacio igual que las pepitas de chocolate dentro de una magdalena que se hincha debido a la levadura que le añadimos a la masa. Todas las galaxias/pepitas de chocolate se alejan entre sí, y los pares más distantes se separan más deprisa. En concreto, si nos encontráramos sobre una pepita de chocolate/galaxia determinada, veríamos que el movimiento de todas las demás en relación con nosotros obedece a la ley de Hubble: todas se alejan de nosotros en línea recta, y las que distan el doble de nosotros se alejan el doble de deprisa. Curiosamente, observaríamos lo mismo con independencia de la pepita de chocolate o la galaxia desde la que miráramos, así que si la distribución de las galaxias no tiene fin, entonces la expansión tampoco tiene un centro, presenta el mismo aspecto desde cualquier lugar.

Desde el segundo punto de vista, el espacio es como la masa de la magdalena: se expande y, por tanto, igual que las pepitas de chocolate no se mueven en relación con la masa, tampoco las galaxias se mueven por el

espacio. Podemos imaginar las galaxias quietas en el espacio (figura 3.2, derecha) mientras se redefinen todas las distancias que median entre ellas. Es como si reetiquetáramos las marcas de las reglas imaginarias que conectan las galaxias para que dejaran de equivaler a milímetros y pasaran a ser centímetros: ahora todas las distancias intergalácticas son 10 veces más grandes que antes.

Esto responde otra de nuestras preguntas: *¿No contradicen la teoría de la relatividad las galaxias que se alejan más rápidamente que la velocidad de la luz?* La ley de Hubble $v = Hd$ implica que las galaxias se alejarán de nosotros más deprisa que la velocidad de la luz si distan de nosotros más de $c/H \approx$ catorce mil millones de años-luz, y no hay ninguna razón para dudar de que tales galaxias existen, de modo que ¿no contradice esto la afirmación einsteiniana de que nada puede viajar más rápidamente que la luz? La respuesta es sí y no: contradice la teoría especial de la relatividad de Einstein de 1905, pero no su teoría general de la relatividad de 1915, y esta última fue la palabra definitiva de Einstein sobre este asunto, así que todo está en orden. La relatividad general liberaliza la limitación de la velocidad: mientras que la relatividad especial sostiene que no puede haber ningún objeto que se mueva en relación con otro a una velocidad mayor que la de la luz *bajo ninguna circunstancia*, la relatividad general tan solo puntualiza que no pueden moverse más rápidamente que la luz el uno en relación con el otro cuando se encuentran en el mismo lugar; en cambio, todas las galaxias que se alejan de nosotros a velocidades superlumínicas distan mucho de nosotros. Si creemos que el espacio se está expandiendo, podemos reformular esa idea diciendo que nada puede viajar más rápidamente que la luz *por el espacio*, pero el espacio en sí es libre de expandirse a la velocidad que le plazca.

Hablando de galaxias distantes, he visto artículos periodísticos que hablan de algunas situadas a unos treinta mil millones de años-luz de nosotros. Si este universo solo tiene catorce mil millones de años ¿cómo es que vemos objetos situados a treinta mil millones de años de distancia? ¿Cómo es que su luz ha tenido tiempo de llegar hasta nosotros? Es más, solo hemos calculado que se alejan de nosotros más deprisa que la velocidad de la luz, lo que hace que suene aún más extraño que podamos verlas. La respuesta en este caso es que no observamos esas galaxias en el lugar donde están ahora, sino donde se encontraban cuando emitieron la luz que nos está llegando ahora. Igual que vemos el Sol con el aspecto que tenía hace ocho minutos y en la posición que ocupaba hace ocho minutos, tendremos que ver una galaxia distante con el aspecto que tenía hace trece mil millones de años y en el lugar donde se

encontraba entonces, que era ¡unas ocho veces más cerca de la Tierra que ahora! Así que la luz de una galaxia tal, nunca ha tenido que viajar más de trece mil millones de años por el espacio para llegar hasta nosotros, porque la expansión del espacio compensa la diferencia. Es como si montamos en una rampa mecánica y avanzamos 20 metros aunque solo demos 10 pasos de un metro.

¿Hacia dónde se expande nuestro universo?

¿No tendría que producirse un accidente de tráfico cósmico en algún lugar lejano allí donde las galaxias que se alejan de nosotros choquen contra el lugar hacia dondequiera que se estén expandiendo? Si este universo se expande de acuerdo con las ecuaciones de Fridman, no habrá tales problemas: tal como ilustraba la figura 3.2, la expansión presenta el mismo aspecto desde cualquier lugar del espacio, así que no puede haber ningún punto conflictivo. Si admitimos el punto de vista de que las galaxias distantes se alejan realmente de nosotros a través de un espacio estático, entonces la razón de que nunca choquen con galaxias más lejanas estriba en que estas otras se alejan más deprisa aún: no podemos alcanzar a un Porsche si conducimos un Ford del modelo *T*. Si, por el contrario, aceptamos el punto de vista de que es el espacio lo que se expande, la explicación radica simplemente en que el volumen no se conserva. Las noticias que nos llegan de Oriente Próximo nos tienen habituados a la idea de que no se puede conseguir más espacio sin quitárselo a otros. En cambio, la relatividad general dice exactamente lo contrario: se puede crear más volumen en una región particular del espacio situada entre galaxias sin que ese volumen nuevo se expanda hacia otras regiones: el volumen nuevo sencillamente permanece entre esas mismas galaxias (figura 3.2, derecha).

El aula cósmica

En otras palabras, por demencial y antiintuitivo que parezca, el universo en expansión es muy lógico y está respaldado por las observaciones astronómicas. De hecho, el peso de los datos observacionales ha experimentado un incremento espectacular desde los tiempos de Edwin Hubble, gracias a la tecnología moderna y a nuevos hallazgos y descubrimientos que analizaremos en breve. La conclusión más elemental es que hasta el mismo universo está cambiando: cuando replegamos la frontera del conocimiento hasta épocas de muchos miles de millones de años atrás,

descubrimos un universo que no se había expandido tanto y que, por lo tanto, era más denso y más poblado. Esto significa que el espacio en el que moramos no es el lugar estático y aburrido que aparece en los axiomas de Euclides, sino un espacio dinámico en evolución que tuvo alguna suerte de infancia (y tal vez algo así como un nacimiento) unos catorce mil millones de años atrás.

El perfeccionamiento espectacular de los telescopios nos ha brindado imágenes tan buenas del cosmos que ahora podemos observar de forma bastante directa su evolución. Imagine que da usted una conferencia en un gran auditorio y que, de repente, nota algo curioso entre los asistentes. Las filas de butacas más próximas a usted están ocupadas por personas de su misma edad. Pero unas 10 filas más atrás, solo hay adolescentes. Tras ellos hay un grupo de niños, y detrás se sientan pequeños de preescolar. Más atrás, casi al fondo del todo de la sala, solo ve bebés. La última fila está completamente vacía hasta donde le alcanza la vista. Cuando escudriñamos nuestro universo con los mejores telescopios, observamos algo parecido: cerca hay un montón de galaxias grandes y maduras similares a la nuestra, pero en lugares muy distantes vemos sobre todo galaxias en ciernes que aún no se han desarrollado por completo. Más allá de ellas no vemos ninguna galaxia en absoluto, solo oscuridad. Como la luz tarda más en llegarnos desde más lejos, la observación a gran distancia equivale a contemplar el pasado. La oscuridad que apreciamos más allá de las galaxias se corresponde con una época en la que las primeras galaxias aún no habían tenido tiempo de formarse. Por entonces, el espacio estaba lleno de gas hidrógeno y helio que la gravitación aún no había tenido tiempo de concentrar en galaxias, y como esos gases son transparentes, como el helio de los globos que hay en las fiestas de cumpleaños, son invisibles para los telescopios.

Pero también hay algo misterioso: durante la conferencia se da usted cuenta de que desde la última fila vacía sale energía: la pared posterior del auditorio no es totalmente oscura, ¡sino que emite un tenue fulgor de microondas! ¿Por qué? Por extraño que parezca, eso es lo que vemos cuando miramos las profundidades más remotas de nuestro universo. Para entender esto debemos avanzar en nuestro empeño por replegar las fronteras del conocimiento hasta instantes aún más lejanos en el tiempo.

¿De dónde salieron las misteriosas microondas?

Creo que tanto de Newton como de Fridman podemos extraer una lección sencilla que se resume en este simple mantra: «¡Atrévete a extrapolar!». En concreto, parte de la interpretación actual de las leyes de la física, aplícalas a una situación inexplorada y comprueba si predicen algo interesante que se pueda observar. Newton echó mano de las leyes del movimiento que estableció Galileo para la Tierra y las extrapoló a la Luna y más lejos. Fridman recurrió a las leyes del movimiento y la gravitación que había desarrollado Einstein para el Sistema Solar, y las extrapoló a todo nuestro universo. En vista de lo fructífero que resultó ser este mantra, tal vez piense usted que arraigaría como un meme entre la comunidad científica. Sobre todo, creerá que después de 1929, cuando cobró aceptación la idea del universo en expansión de Fridman, los científicos de todo el mundo competirían entre sí para ver qué ocurría si se extrapolaba hacia atrás en el tiempo. Pues, si ha pensado eso, se equivoca… Da igual cuánto insistamos los científicos en que practicamos la búsqueda racional de la verdad, somos tan proclives como cualquier otra persona a debilidades humanas tales como los prejuicios, la presión de grupo y el gregarismo. Es evidente que hace falta algo más que mera habilidad con los cálculos para superar esos defectos.

Considero que el siguiente superhéroe cosmológico con la madera necesaria para hacerlo fue otro ruso: George Gamow, quien en Leningrado tuvo como director de tesis nada menos que a Aleksandr Fridman, y aunque este falleció dos años después de que Gamow comenzara sus estudios, transmitió a Gamow tanto sus ideas como su arrojo intelectual.

La pantalla de plasma cósmica

Puesto que este universo se está expandiendo en la actualidad, tuvo que ser más denso y más poblado en el pasado. Pero ¿se ha estado expandiendo siempre? Quizá no: el trabajo de Fridman admite la posibilidad de que este universo atravesara un periodo de contracción en el pasado, y que toda la materia que se nos venía encima se frenara con suavidad, se detuviera y empezara a acelerarse de nuevo en una dirección opuesta a nosotros. Ese rebote cósmico solo podría haberse producido si la densidad de la materia fuera mucho más baja de lo que sabemos que es hoy en día. Gamow decidió emprender un estudio sistemático de la otra opción, que era más genérica y más extrema: la expansión desde un principio. Tal como explicó en una obra de 1946, esta propuesta implica que, si imaginamos el gran teatro del cosmos como una película y lo vemos reproduciéndolo hacia atrás, observaremos un aumento ilimitado de la densidad de nuestro universo. Como el espacio

intergaláctico está lleno de hidrógeno, este gas se comprimirá cada vez más y, por tanto, acumulará más temperatura cuanto más nos alejemos en el tiempo. Si calentamos un cubo de hielo, este se funde. Si calentamos agua líquida, se transforma en gas: vapor. De manera parecida, si calentamos el gas hidrógeno, este pasa a un cuarto estado: plasma. ¿Por qué? Pues porque un átomo de hidrógeno no es más que un electrón en órbita alrededor de un protón, y el gas hidrógeno es un conjunto de tales átomos donde unos rebotan contra otros. Si la temperatura aumenta, los átomos se mueven más rápidamente y chocan con más fuerza entre sí. Si se alcanza la temperatura suficiente, las colisiones se tornan tan intensas que los átomos se rompen y los electrones y los protones se separan: un plasma de hidrógeno no es más que ese caldo de electrones y protones libres.

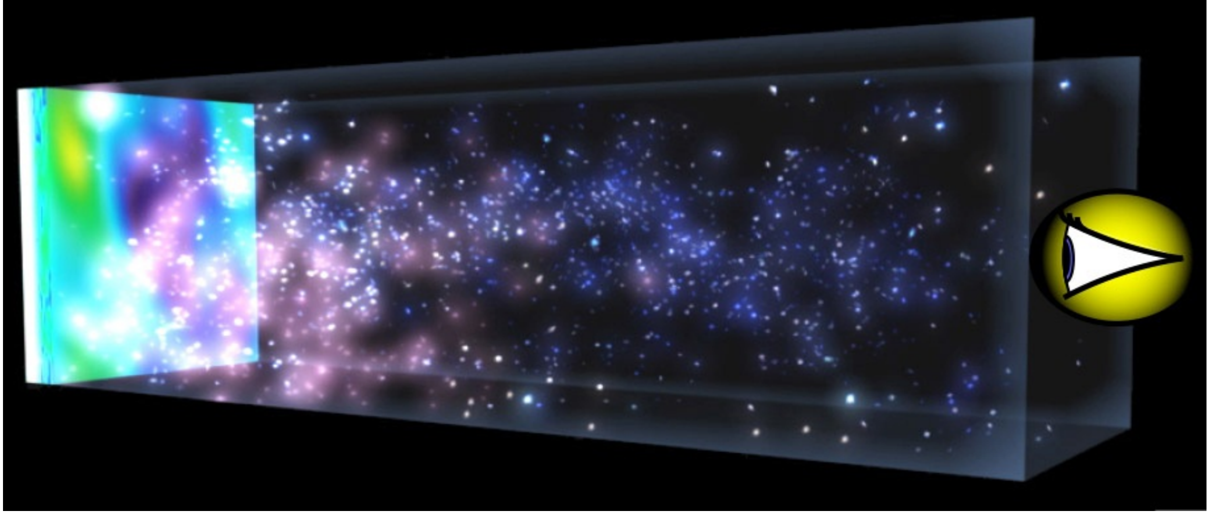


Figura 3.3: Como la luz distante tarda en alcanzarnos, cuanto más lejos observamos, más retrocedemos en el tiempo. Más allá de las galaxias más lejanas vemos una pared opaca de plasma de hidrógeno brillante cuyo fulgor ha tardado unos catorce mil millones de años en llegar hasta nosotros. Esto se debe a que el mismo hidrógeno que llena el espacio actual estaba lo bastante caliente como para existir en estado de plasma catorce mil millones de años atrás, cuando nuestro universo tenía tan solo unos cuatrocientos mil años de edad. (Crédito de ilustración: Adaptación de una imagen del equipo *NASA/WMAP*).

En otras palabras, Gamow predijo que nuestro universo comenzó con una Gran Explosión, y que hubo una época en que el plasma llenaba todo el espacio. Lo especialmente interesante de esto es que se trata de una predicción comprobable: si bien el gas hidrógeno frío es transparente e invisible, el plasma de hidrógeno caliente es opaco y fulgura con intensidad, como la superficie del Sol. Esto significa que a medida que miramos más lejos en el espacio, como en la figura 3.3, nos topamos con galaxias viejas cercanas, a continuación con galaxias jóvenes detrás de ellas, después con gas hidrógeno transparente y, por último, con una pared de plasma de hidrógeno

brillante. No podemos ver más allá de esa pared porque es opaca y, por tanto, bloquea el acceso a lo que hubo antes, como un censor cósmico. Es más, tal como ilustra la figura 3.4, eso es lo que se ve en *todas* direcciones, ya que miremos hacia donde miremos, siempre retrocedemos en el tiempo. Así que da la impresión de que estamos rodeados por una esfera de plasma gigantesca.

En el libro de 1946 de Gamow, su teoría de la Gran Explosión predecía que tenía que verse esa esfera de plasma. Puso a sus alumnos Ralph Alpher y Robert Herman a estudiar el asunto con más detalle, y unos años después publicaron un artículo con la predicción de que tenía que fulgurar a una temperatura aproximada de cinco grados sobre el cero absoluto, lo que significa que irradiaría sobre todo microondas en lugar de luz visible. Por desgracia, no lograron convencer a ningún astrónomo para que buscara este fondo cósmico de microondas en el firmamento, y su trabajo cayó durante largo tiempo en el olvido, igual que había ocurrido con el descubrimiento de Fridman del universo en expansión.

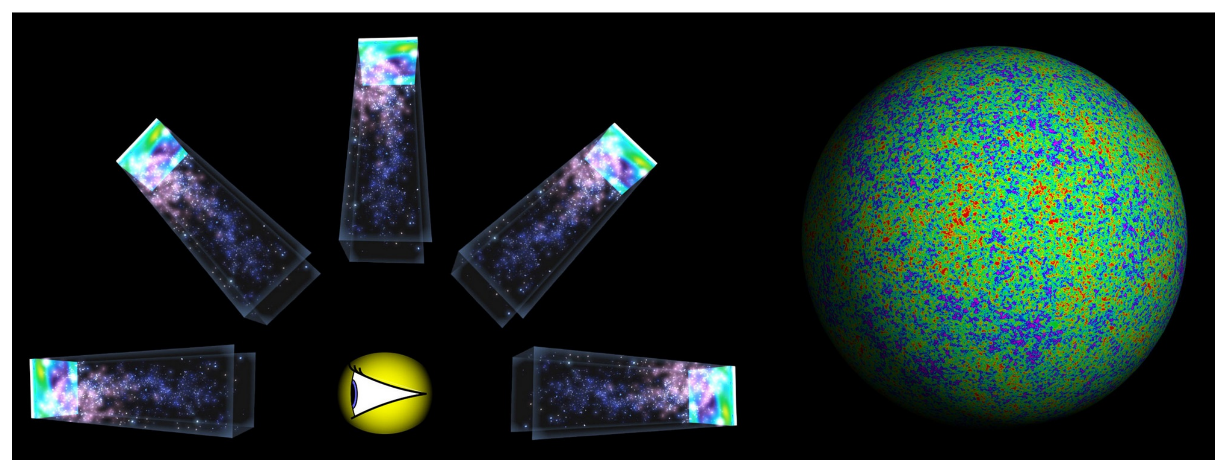


Figura 3.4: Da la impresión de que nos encontramos en medio de una esfera de plasma gigantesca, porque la pared de plasma de la figura anterior se observa en cualquier dirección en la que se mire.

La observación del resplandor

En 1964, un grupo de la Universidad de Princeton había reparado en que ese indicador observable de microondas tenía que existir, y planeó una búsqueda observacional del mismo, pero les tomaron la delantera. Ese mismo año Arno Penzias y Robert Wilson se encontraban probando un novedoso telescopio de microondas en los Laboratorios Bell de Nueva Jersey y encontraron algo sorprendente: el telescopio detectaba una señal inexplicable que aparecía siempre, ¡con independencia del lugar hacia el que apuntaran el instrumento! ¡Curioso! Esperaban detectar señales únicamente al apuntar hacia objetos

concretos del cielo, como el Sol o un satélite transmisor de microondas. Sin embargo, en lugar de eso, era como si todo el cielo brillara a una temperatura de tres grados por encima del cero absoluto, un valor próximo a los cinco grados previstos por el grupo de Gamow. Emprendieron una comprobación escrupulosa de todas las fuentes de ruido locales y por un momento sospecharon de unas palomas que habían anidado en el telescopio y lo habían cubierto de excrementos. Hace poco comí con Arno y me contó que metieron las palomas en una caja de madera con comida y la mandaron a otro campus de los Laboratorios Bell situado bien lejos con instrucciones de que las soltaran al llegar a destino. Por desgracia, se trataba de palomas mensajeras… aunque en su libro solo consta que se «deshicieron» de las aves cuando volvieron, conseguí que me revelara la cruda realidad tras ingerir un poco de vino: usaron una escopeta… Aunque las palomas habían desaparecido, la misteriosa señal seguía apareciendo: habían descubierto el fondo cósmico de microondas, el tenue resplandor de la Gran Explosión.

El hallazgo causó sensación y les valió el Premio Nobel de Física de 1978. A partir de los cálculos de Gamow y sus alumnos, dedujeron que la esfera de plasma de la figura 3.4 tuvo que alcanzar alrededor de la mitad de la temperatura que impera en la superficie del Sol y que, durante el viaje a través del espacio a lo largo de catorce mil millones de años desde ese fulgor tan caliente hasta llegar a nosotros, esa radiación se enfrió 1000 veces hasta los tres grados sobre el cero absoluto observados, a medida que el espacio se expandió 1000 veces. En otras palabras, todo este universo estuvo alguna vez a la misma temperatura que una estrella y eso demostró y validó la salvaje extrapolación de la teoría de la Gran Explosión caliente de Gamow.

Instantáneas de este universo recién nacido

Una vez detectada la esfera de plasma, la carrera consistió en obtener las primeras fotografías de ella. Como la temperatura de la radiación era más o menos la misma en todas direcciones, las imágenes que consiguieron tomar Penzias y Wilson se parecían a una de esas postales de broma en las que se lee «San Francisco entre la niebla», donde lo único que se ve es una blancura uniforme. Para obtener tomas interesantes dignas de considerarse las primeras imágenes de nuestro universo recién nacido había que aumentar el contraste hasta captar ligeras variaciones de un lugar a otro. Tales variaciones tenían que existir porque si en el pasado hubieran imperado unas condiciones idénticas en todas partes, las leyes de la física las habrían mantenido idénticas en todas partes también en el momento presente, lo cual diferiría mucho del

universo granulado que observamos ahora, con galaxias en algunos sitios pero no en otros.

Sin embargo, la obtención de esas imágenes del cosmos naciente se reveló tan difícil que se necesitaron casi tres décadas de avances tecnológicos. Para eliminar el ruido de las medidas, Penzias y Wilson tuvieron que usar helio líquido a fin de enfriar el detector hasta una temperatura cercana a la del fondo cósmico de microondas. Las fluctuaciones de temperatura de un lugar a otro del cielo resultaron ser mínimas, cercanas al 0,001 %, así que para conseguir imágenes de nuestro universo recién nacido se requería una precisión 100 000 veces mayor que la de las mediciones de Penzias y Wilson. Científicos experimentales de todo el mundo aceptaron el desafío y fracasaron. Algunos dijeron que era imposible, pero otros se negaron a rendirse. El 1 de mayo de 1992, cuando atravesaba el ecuador de mis estudios de posgrado, bulleron los rumores en la incipiente Internet: George Smoot iba a anunciar los resultados del experimento más ambicioso hasta la fecha en relación con el fondo cósmico de microondas, efectuado desde la fría oscuridad del espacio con un satélite de la NASA llamado *COBE*, o *COsmic Background Explorer* [explorador del fondo cósmico]. Estaba programado que mi director de tesis, Joe Silk, presentara la intervención de George y, antes de que volara a Washington, D. C., le pregunté qué posibilidades había, a su entender, de que se tratara de un descubrimiento. Joe creía que no habían observado las fluctuaciones cósmicas, sino tan solo ruido radioeléctrico procedente de nuestra propia Galaxia.

Pero en lugar de dar una conferencia decepcionante, George Smoot soltó un bombazo que transformó no solo mi propia carrera, sino todo el campo de la cosmología: él y los miembros de su equipo ¡habían detectado las fluctuaciones! Stephen Hawking elogió aquello como «el hallazgo más importante del siglo, ¡cuando no de todos los tiempos!» porque, tal como veremos más adelante, esas imágenes de cuando este universo tenía tan «solo» cuatrocientos mil años de edad, contenían claves cruciales sobre nuestros orígenes cósmicos.

La fiebre del oro

Ahora que *COBE* había encontrado oro, se propagó la fiebre de extraer más. Tal como se ve en la figura 3.5, el mapa celeste del *COBE* era bastante borroso porque la baja resolución de las imágenes difuminaba rasgos inferiores a unos siete grados. Así que el siguiente paso natural consistía en ampliar una parte pequeña del cielo con una resolución mayor o con menos

ruido. Tal como explicaré más adelante, esos mapas de alta resolución portan codificada la respuesta a algunos interrogantes cosmológicos decisivos. A mí me encantaba la fotografía desde que a los doce años ahorré para comprarme mi primera cámara repartiendo folletos de publicidad en Estocolmo, así que tomar imágenes de nuestro universo me atrajo de forma instintiva. También había disfrutado enredando con imágenes y gráficas por ordenador, ya fueran para el periódico del instituto, que se llamaba *Curare*, o para el juego FRAC de libre distribución para computadoras, un clon del Tetris en 3D que me sufragó el viaje por el mundo que realicé en 1991. Así que me sentí muy afortunado cuando un grupo de científicos experimentales me permitió colaborar con él para convertir sus datos en mapas del cielo.

Mi primer golpe de suerte fue conocer a Lyman Page, un joven profesor de Princeton. Me gustó su sonrisa traviesa y aniñada, y tuve el coraje de pedirle una posible colaboración tras una conferencia que dio. Me cayó aún mejor cuando supe que había pasado años navegando por el Atlántico antes de iniciar los estudios de posgrado. Acabó encomendándome los datos de un telescopio de microondas situado en la localidad canadiense de Saskatoon, con el que él y su grupo habían pasado tres años escudriñando una región del cielo situada justo sobre el polo norte.

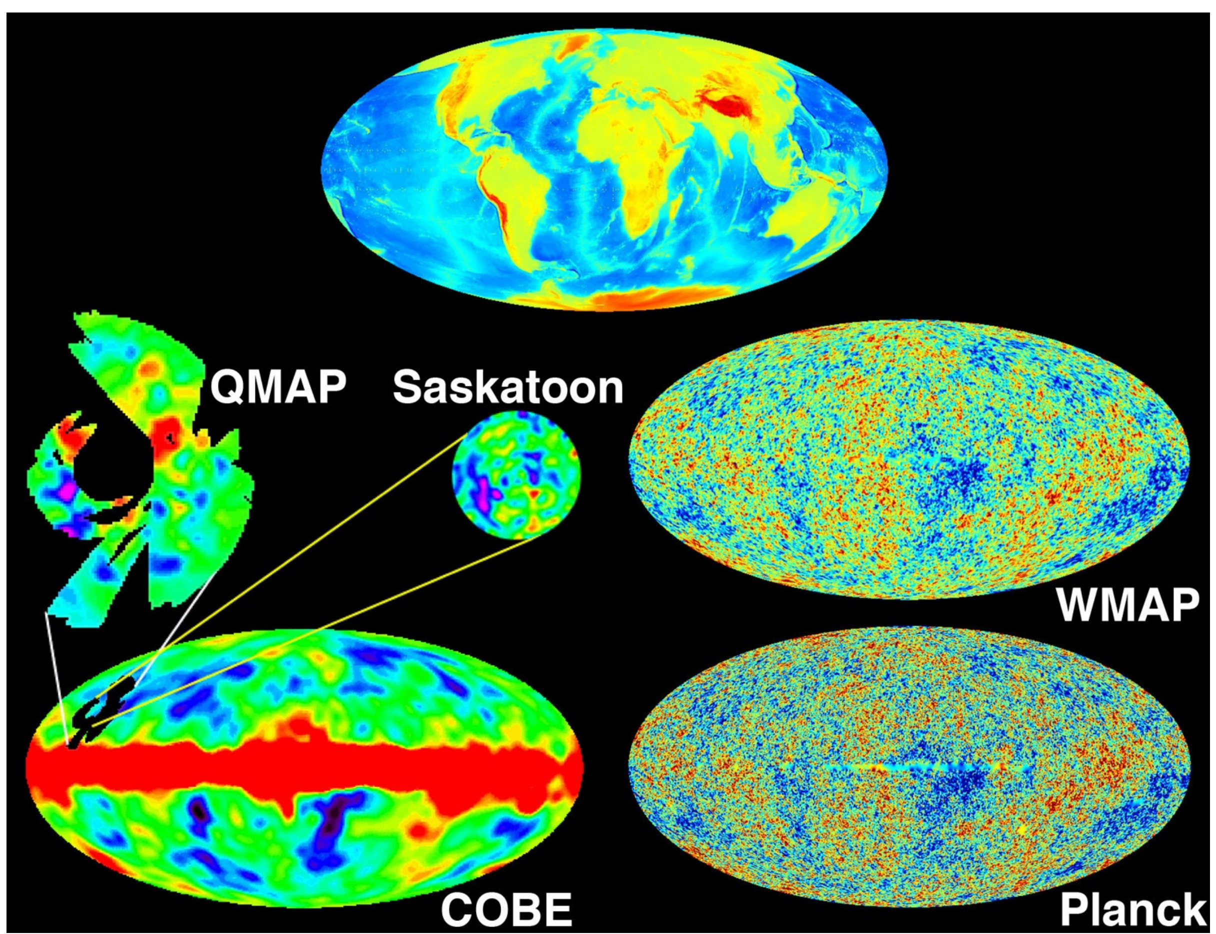


Figura 3.5: Cuando se exhiben mapas de todo el cielo conviene proyectarlos sobre una hoja plana, tal como hacemos con los mapas terrestres (arriba), aunque de forma que se interpreten mirando hacia arriba, hacia el cielo, en lugar de mirando hacia abajo, hacia el suelo. La «imagen de nuestro universo recién nacido» del *COBE* (izquierda inferior) era bastante borrosa, lo que alentó numerosos experimentos para ampliarla a base de imágenes de pequeñas porciones de cielo con una resolución mayor (centro izquierda) antes de que los satélites *WMAP* y *Planck* obtuvieran mapas de alta resolución de todo el cielo (derecha) de 3 megapíxeles y 50 megapíxeles, respectivamente. Esos mapas del cielo aparecen rotados en relación con el mapa terrestre, de manera que el plano central de cada uno de ellos no se corresponde con el plano del ecuador terrestre, sino con el plano de la Galaxia (banda gris de la imagen de la izquierda inferior); el polo norte de la Tierra apunta hacia el centro del mapa Saskatoon. (*Mapa terrestre de Patrick Dineen*).

La conversión de aquello en un mapa resultó más difícil de lo que pensaba, porque los datos no consistían en fotos del cielo, sino en largas tablas de números que codificaban cuántos voltios se habían medido mediante la adición o sustracción de diferentes partes del cielo de diversas maneras complejas. Pero también me sorprendió lo mucho que me entusiasmó la tarea, la cual me obligó a esforzarme al máximo en teoría de la información y procesamiento de datos computacionales y, después de muchas veladas propulsadas con muesli en el despacho de Múnich donde realicé mi estancia posdoctoral, conseguí terminar el mapa Saskatoon de la figura 3.5 justo a tiempo para presentar una ponencia en un gran congreso de cosmología

celebrado en los Alpes franceses. Aunque a estas alturas ya he dado cientos de conferencias, algunas las conservo en la memoria como momentos mágicos que siempre me arrancan una sonrisa cuando las recuerdo. Aquella fue una de las mágicas. El corazón me latía con fuerza mientras avanzaba hacia la tarima y recorría la sala con la mirada. Estaba llena de gente. A muchas de aquellas personas las conocía de haber leído sus trabajos, pero la mayoría no tenía ni idea de quién era yo. Acudieron al congreso más animadas por las excelentes condiciones para practicar esquí que por oír a principiantes absolutos como yo. Pero no solo noté que el corazón se me desbocaba, también percibí una energía enorme en la sala. La gente estaba entusiasmada con todos los avances relacionados con el nuevo fondo cósmico de microondas, y me sentí muy honrado y emocionado de formar una pequeña parte de aquello. El año 1996 se encontraba en la era precámbrica, cuando aún dábamos las conferencias con transparencias de plástico, y me guardé un as en el atril para el final de mi intervención: una diapositiva con el mapa Saskatoon de la figura 3.5 como ampliación del mapa del *COBE*. Noté que el entusiasmo se propagó por la sala como una onda expansiva, y un grupo de personas se quedó en torno al retroproyector durante la mayor parte del descanso que venía a continuación para volver a verla y formular preguntas. Dick Bond, uno de los fundadores de la cosmología del fondo cósmico de microondas, se me acercó y me dijo sonriendo: «¡No puedo creer que Lyman te diera los datos!».

Sentí que la cosmología entraba en una edad dorada donde los nuevos descubrimientos estaban aportando más gente y financiación a la especialidad, lo que a su vez conllevó otros descubrimientos dentro de un círculo no vicioso, sino virtuoso. El siguiente mes, abril de 1996, se aprobó la financiación para dos satélites nuevos con mejoras abismales en cuanto a resolución y sensibilidad frente al *COBE*. Uno fue la misión de la NASA llamada *WMAP*, dirigida por Lyman Page y un grupo muy allegado de colegas, y el otro fue la misión europea *Planck*, con la que disfruté enormemente realizando cálculos y pronósticos para la propuesta de subvención. Como las misiones espaciales requieren muchos años de planificación, equipos pequeños de todo el mundo compitieron para robarle protagonismo a *WMAP* y *Planck*, o al menos para cosechar algunos de los frutos más accesibles antes de su lanzamiento. Como resultado, el proyecto Saskatoon acabó siendo una más de las múltiples y gratas colaboraciones con datos en las que participé. Trabajé con creadores de experimentos con nombres tan exóticos como *HACME*, *QMAP*, *Tenerife*, *POLAR*, *PIQ* y

Boomerang para confeccionar imágenes de nuestro universo en ciernes a partir de sus datos, o para calcular lo que nos revelaban sobre el cosmos. Mi estrategia básica de juego consistió en ser el mediador entre la teoría y la experimentación: vi que la cosmología estaba pasando de ser una disciplina con escasez de datos a convertirse en una materia con más datos de los que la gente podía manejar, así que decidí desarrollar herramientas para sacar el máximo provecho de esa torrentera de información. En concreto, seguí la táctica de usar una rama de las matemáticas conocida como teoría de la información para calcular cuánta información relevante sobre este universo contenía un conjunto determinado de datos. Lo habitual era que los megabytes, gigabytes o terabytes registrados solo encerraran una cantidad modesta de bits de información cosmológica codificada y oculta en medio de un montón de ruido procedente de la electrónica del detector, emisiones atmosféricas, radiación de la Galaxia y otras fuentes. Aunque ya se conocía un método matemático perfecto para encontrar esas agujas en el pajar, por lo común era demasiado complejo aplicarlo en la práctica porque precisaba miles de años de cálculos por computadora. Publiqué varios métodos para analizar datos que no eran perfectos, pero que extraían casi toda la información con suficiente rapidez como para resultar útiles en la práctica.

Me encanta el fondo cósmico de microondas por muchas razones. Por ejemplo, a él le debo mi primer matrimonio y la existencia de mis hijos, Philip y Alexander: conocí a mi exesposa, Angélica de Oliveira Costa, porque vino de Brasil a Berkeley como estudiante de posgrado para trabajar con George Smoot, y acabamos manteniendo una colaboración muy estrecha no solo cambiando pañales, sino también en muchos de los proyectos de análisis de datos recién mencionados. Uno de esos proyectos fue *QMAP*, un telescopio lanzado por Lyman Page, Mark Devlin y otros colaboradores dentro de un globo de gran altitud para evitar la mayoría del ruido de microondas que induce la atmósfera terrestre.

* * *

¡Oh, no! Son casi las dos de la madrugada del 1 de mayo de 1998 y las cosas se ponen feas. Solo faltan siete horas para que salga el vuelo que nos llevará a Chicago, donde se supone que debo presentar los resultados del *QMAP* en un congreso de cosmología, pero Angélica y yo aún estamos en mi despacho del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton meneando la cabeza. Hasta ahora, todos los experimentos sobre el fondo cósmico de microondas

obligaban a confiar en que no se hubiera cometido ningún error ni se hubiera pasado por alto nada importante. Para tener credibilidad en ciencia es crucial que un experimento independiente confirme los resultados propios, pero como la gente había observado en direcciones diferentes con resoluciones diversas, nunca era viable comparar las imágenes del cielo de dos experimentos distintos para comprobar si concordaban entre sí. Nunca, hasta aquel momento, es decir: los mapas del cielo de Saskatoon y *QMAP* se superponían bastante en el trozo de cielo con forma de plátano que se ve en la figura 3.5. Ahí estamos Angélica y yo con la mirada fija en la pantalla del ordenador, consternados y hundidos: tenemos ambos mapas, el de Saskatoon y el de *QMAP*, uno junto al otro y ¡no coinciden en absoluto! Entornamos los ojos e intentamos imaginar que las discrepancias se deben tan solo a ruido instrumental. Pero no, no basta con hacerse ilusiones. Tanto trabajo únicamente para llegar a la conclusión de que al menos uno de los mapas está mal. Y ¿cómo voy a dar una conferencia sobre esto? Sería una humillación absoluta no solo para nosotros, sino también para toda la gente que confeccionó y llevó a cabo los experimentos.

De repente, Angélica, que ha estado examinando el programa de ordenador, descubre un signo negativo sospechoso que, por decirlo sin florituras, podría hacer que el mapa *QMAP* apareciera boca abajo. Lo solucionamos, volvemos a ejecutar el código, y nos miramos con incredulidad mientras va surgiendo el nuevo mapa en la pantalla: ¡ahora la concordancia entre ambos mapas es impresionante! ¡Un golpe decisivo! Dormimos unas pocas horas, volamos hasta Chicago, improviso mi intervención a base de pura adrenalina y recorro el trecho que separa el coche de alquiler del auditorio del Fermilab para llegar justo a tiempo para mi charla. Estoy tan nervioso que ni siquiera reparo en mi infracción hasta que ya de noche me encuentro con la misteriosa desaparición de nuestro coche.

«Pero ¿dónde lo aparcó?», pregunta el guarda.

«Pues ahí mismo, delante de la boca de incendio», respondo y, de repente, me siento estúpido por segunda vez en el mismo día…

El balón de playa cósmico

La fiebre del oro para explotar la mina del cielo de microondas prosiguió durante años con más de 20 experimentos distintos alimentados entre sí. En breve le hablaré un poco más sobre algunos de ellos. Y después llegó el *WMAP*. A las dos de la tarde del 11 de marzo de 2003 la sala estaba abarrotada: todos permanecimos pegados a la pantalla en la que los miembros

del equipo del *WMAP* anunciaron sus resultados en directo a través de NASA-TV. Mientras que los experimentos realizados desde la superficie terrestre y desde globos sonda solo lograron cartografiar partes del cielo, el satélite *WMAP* había cartografiado el cielo íntegro, igual que el *COBE*, pero con una sensibilidad y resolución muchísimo mejores. Me sentí igual que de pequeño en Nochebuena cuando al fin llegaba Papá Noel, solo que en este caso no llevaba meses pensando en ese momento, sino años. La espera valió la pena: las imágenes obtenidas fueron sensacionales; tanto como su ética de trabajo y la falta de sueño: consiguieron la financiación, la construcción, el lanzamiento, el análisis de datos y los resultados en menos de seis años, tres veces más rápido que *COBE*. De hecho, el director del proyecto *WMAP*, Chuck Bennett, casi se muere por cumplir con el calendario previsto: David Spergel, otro colaborador clave en el proyecto, me contó que Chuck sufrió un colapso y tuvo que permanecer tres semanas hospitalizado después del lanzamiento.

Es más, pusieron todos sus datos en Internet a disposición del público para que los cosmólogos de cualquier lugar del mundo pudieran analizarlos de nuevo por sí mismos. Cosmólogos como yo. Me había llegado el turno de trabajar como un loco mientras ellos recuperaban el sueño perdido. Sus mediciones eran excelentes, pero estaban contaminadas con ruido radioeléctrico procedente de nuestra Galaxia, visible en la figura 3.5 como una banda horizontal en el mapa del *COBE*. Lo malo es que esa contaminación de microondas procedente de la Galaxia y de otras galaxias se encuentra por todas partes en el cielo, aunque sea a un nivel demasiado bajo para detectarlo con facilidad. Lo bueno es que la contaminación tiene un color diferente al de la señal (depende de la frecuencia de otro modo), y que *WMAP* había tomado imágenes del cielo en cinco frecuencias independientes. El equipo de *WMAP* había utilizado esta información adicional para limpiar la contaminación, pero yo me ilusioné con la idea de conseguir un método aún mejor para lograrlo, basado en la teoría de la información, que generara un mapa más limpio con una resolución mayor (figura 3.5, centro derecha). Tras realizar todos los cálculos durante un mes junto con Angélica y mi viejo amigo Andrew Hamilton, presentamos el artículo y mi vida empezó a recuperar la normalidad. Me divirtió crear la imagen esférica del fondo de microondas que se ve en la figura 3.4 y en la cubierta de este libro, y al equipo del *WMAP* le gustó tanto que creó su propia versión y la imprimió sobre una pelota de playa hinchable que aún adorna mi despacho en la

actualidad. La llamo mi «universo», porque es la imagen icónica de los límites de todo lo que en principio cabe observar.

El eje del mal

Tal como explicaré más adelante, el tamaño de las manchas que aparecen en el fondo cósmico de microondas oculta, encriptados, datos cósmicos cruciales. Igual que los sonidos y los colores se descomponen en diferentes frecuencias, también se pueden descomponer mapas bidimensionales del fondo de microondas en una suma de muchos mapas complementarios distintos (véase la figura 3.6) que reciben el rarito nombre de *multipolares*. Estos mapas multipolares contienen, en esencia, la contribución debida a trozos de distintos tamaños, y ya desde el *COBE* parecía haber algo sospechoso en el segundo multipolo, el denominado *cuadrupolo*: los fragmentos mayores del mapa aparecían más débiles de lo esperado. Nadie había conseguido aún realizar un *mapa* del cuadrupolo para ver qué pasaba con él: para ello se necesitaba un mapa de todo el cielo, pero las microondas de la Galaxia contaminaban parte del cielo de manera irreparable.

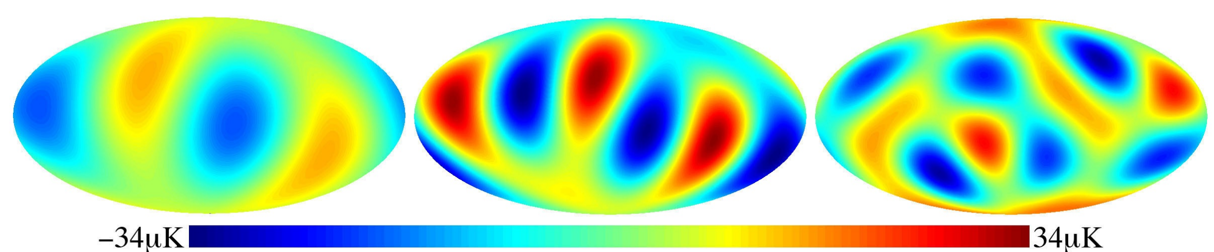


Figura 3.6: Al descomponer el mapa del *WMAP* que aparece en la figura 3.5 en una suma de multipolos que muestran trozos de un tamaño cada vez más reducido, los dos primeros (mapas de izquierda y centro) revelan un misterioso alineamiento alrededor de lo que se ha apodado como «eje del mal». Los diferentes colores indican cuánto más caliente o frío que la media se encuentra el cielo en distintas direcciones; la barra inferior indica la escala en μK, millonésimas de grado.

Hasta ahora: nuestro mapa era tan nítido que tal vez fuera válido sobre la totalidad del firmamento. Estaba muy avanzada la noche y faltaba poco para que presentáramos el artículo del mapa. Angélica y los niños dormían, y me sentí tentado a entregarme también yo al descanso. Pero la curiosidad por saber qué aspecto tendría aquel molesto cuadrupolo me decidió a escribir un programa de ordenador para obtener una imagen del mismo. Cuando al fin apareció en la pantalla (figura 3.6, izquierda), me quedé muy intrigado: no solo se revelaba tan débil como era de esperar (las fluctuaciones de temperatura entre las manchas calientes y frías se acercaban mucho a cero), sino que tenía la forma de una curiosa banda unidimensional que cruzaba todo el cielo, en lugar de mostrarse como un caos aleatorio, tal como predecía la

teoría. Estaba realmente cansado a esas alturas, pero decidí compensarme aquel trabajo de programación a altas horas de la noche y depurar una imagen más, así que cambié el 2 por el 3 en el programa y lo volví a ejecutar para obtener una imagen del tercer multipolo, llamado *octupolo*. ¡Vaya! ¿Qué…? Arriba aparecía otra banda unidimensional (figura 3.6, centro) al parecer alineada con el cuadrupolo. ¡Aquello no coincidía con la forma que se suponía que debía tener este universo! A diferencia de las fotografías humanas, las del universo no debían mostrar ninguna dirección especial, como «arriba»: debían verse muy similares incluso al rotarlas. Sin embargo, las imágenes del universo en ciernes que me mostraba la pantalla del ordenador contenían unas bandas parecidas a las rayas de una cebra alineadas en una sola dirección específica. Pensé que habría un error en el código, así que cambié el 3 por el 4 y volví a ejecutar el programa, pero la representación gráfica del cuarto multipolo (figura 3.6, derecha) mostró el aspecto esperado: un caos aleatorio sin ninguna dirección privilegiada.

Después de que Angélica efectuara una comprobación doble de todo, comentamos este descubrimiento sorprendente en el artículo sobre el mapa, el cual tuvo una repercusión inesperada. Salí mencionado en el *New York Times*, el cual mandó un fotógrafo para que nos tomara primeros planos. Tanto nosotros como muchos otros grupos realizamos estudios más detallados, y alguien apodó «el eje del mal» a aquella dirección especial. Hubo quien la explicó como una casualidad estadística o como contaminación de la Galaxia, mientras que otros afirmaron que era mucho más extraña de lo que habíamos comentado nosotros, porque se habían detectado anomalías adicionales incluso para los multipolos 4 y 5 empleando un método diferente. Análisis posteriores descartaron otras explicaciones exóticas, como que vivimos en un pequeño «universo en forma de rosquilla» donde el espacio vuelve a unirse consigo mismo (véase la página 45), pero hasta el día de hoy el eje del mal me sigue intrigando tanto como la primera noche.

El fondo de microondas adquiere madurez

En 2006 nos invitaron a Angélica y a mí a ir a Estocolmo para celebrar que el descubrimiento del *COBE* había recibido el Premio Nobel de Física. Como suele ocurrir en ciencia, había habido roces en el equipo del *COBE* por la atribución de los méritos. El premio lo compartieron George Smoot y John Mather, y me alivió ver que mantenían una cercanía conciliadora. Consiguieron invitar a todo el equipo del *COBE* para que asistiera y disfrutara de una gloria bien merecida, y sentí que el torrente interminable de fiestas

elegantes contribuyó a cerrar las heridas y a hacer hincapié en lo obvio: entre todos habían conseguido algo mucho más importante que llevar a dos tipos hasta el premio, porque aquella primera imagen suya de este universo en ciernes inauguró un campo de estudio nuevo y apasionante y abrió las puertas de una nueva era dentro de la cosmología. Solo habría deseado que Gamow, Alpher y Herman también hubieran podido estar allí.

El 21 de marzo de 2013 me levanté a las cinco de la mañana con gran expectación y sintonicé la retransmisión en directo desde París con la que el equipo del satélite *Planck* hizo públicas sus primeras imágenes del fondo de microondas. *ACBAR*, *ACT*, el South Pole Telescope (Telescopio del Polo Sur) y otros experimentos habían perfeccionado los conocimientos sobre el fondo de microondas en la década anterior, pero aquello representaba el mayor hito desde el *WMAP*. Mientras me afeitaba, George Efstathiou fue describiendo los resultados, y sentí que me recorría una oleada de nostalgia y entusiasmo. Me trasladé al mes de marzo de 1995, cuando George me invitó a acudir a Oxford para trabajar con él en el desarrollo de métodos nuevos para analizar los datos de *Planck*. Era la primera vez que alguien me invitaba a participar en una investigación conjunta, y me sentí muy agradecido por la oportunidad que me brindaba. Logramos una técnica novedosa para eliminar símbolos contaminantes que contribuyó a que la Agencia Espacial Europea financiara *Planck*. Ahora ¡los resultados se le desvelarían al fin a ese Max dieciocho años mayor que veía en el espejo del baño!

Cuando George reveló el nuevo mapa del cielo de *Planck*, tuve que soltar la maquinilla de afeitar para situar el mapa de WMAP cuyo primer plano habíamos limpiado junto al mapa de George en la pantalla del portátil. *¡Vaya, encajan a la perfección!*, pensé. *¡Y el eje del mal sigue ahí!* He colocado juntos ambos mapas en la figura 3.5 para facilitar su comparación. Como se ve, todos los rasgos grandes mantienen una concordancia espléndida, pero el mapa de *Planck* contiene muchas más manchas minúsculas. Esto se debe a que cuenta con una sensibilidad y una resolución muy superiores, lo que permite tomar imágenes de rasgos diminutos que el satélite WMAP dejó borrosos. ¡Es indudable que el mapa de *Planck* bien valía la espera! Lo he proyectado en forma esférica para que pueda disfrutar de la alta calidad del color en la cubierta delantera de este libro. Gracias a su calidad excepcional, *Planck* ofrece las respuestas para evaluar el rendimiento de *WMAP*, y tras una asimilación cuidadosa de los datos de *Planck*, veo con claridad que el equipo del WMAP merece un 10, al igual que el equipo del *Planck*. Sin embargo, creo que la mayor sorpresa en relación con *Planck* es que no supuso ninguna

sorpresa en absoluto: básicamente confirmó la imagen cosmológica que ya teníamos, aunque con una precisión mucho mayor. El fondo cósmico de microondas había alcanzado la madurez.

En resumen, ahora hemos replegado la frontera del conocimiento desde catorce mil millones de años atrás hasta unos cuatrocientos mil años después de la Gran Explosión, y hemos visto que todo lo que nos rodea salió de un plasma caliente que llenaba todo el espacio. Por entonces no había gente, ni planetas, estrellas o galaxias, tan solo átomos que chocaban entre sí por doquier e irradiaban luz. Pero aún no hemos indagado en el misterio del origen de esos átomos.

¿De dónde salieron los átomos?

El reactor cósmico de fusión

Ya hemos visto que la audaz extrapolación de Gamow hacia atrás en el tiempo predijo el fondo cósmico de microondas, el cual nos ha brindado imágenes apabullantes de nuestro universo en ciernes. Por si este éxito fuera poco, remontó la extrapolación aún más atrás en el tiempo y calculó las consecuencias. Cuanto más atrás en el tiempo, mayor era la temperatura. Como hemos dicho, cuatrocientos mil años después de la Gran Explosión, el hidrógeno que llenaba el espacio estaba a miles de grados, alrededor de la mitad de la temperatura que alberga la *superficie* del Sol, así que le pasaba lo mismo que al hidrógeno en la superficie del Sol: brillaba y así creó la radiación del fondo cósmico de microondas. Gamow también reparó en que un minuto después de la Gran Explosión, el hidrógeno se encontraba a una temperatura aproximada de 1000 millones de grados, mayor que la que impera en el *núcleo* del Sol, así que al hidrógeno de entonces tuvo que ocurrirle lo mismo que al hidrógeno en el núcleo del Sol hoy: fusión, convertir hidrógeno en helio. Sin embargo, la expansión y el enfriamiento de nuestro universo apagaron bien pronto ese reactor cósmico de fusión porque el universo se tornó demasiado frío, así que no dio tiempo a que lo transformara todo en helio. Animados por Gamow, sus alumnos Alpher y Herman efectuaron un cálculo detallado de lo que habría sucedido con la fusión, si bien, como trabajaron a finales de la década de 1940, fueron unos cálculos limitados porque aún no existían las computadoras modernas.

Pero ¿cómo se demuestra esta predicción si este universo no fue transparente durante sus primeros cuatrocientos mil años y todo lo que ocurrió en aquel tiempo permanece oculto a la vista, censurado por la pantalla de plasma del fondo cósmico de microondas? Gamow se dio cuenta de que la situación era equiparable a la de la teoría de los dinosaurios: ¡no podemos ver de manera directa qué sucedió, pero disponemos de signos fósiles! Cuando se repiten los cálculos con datos y computadoras actuales, se deduce que en aquella época en que todo este universo era un reactor de fusión, alrededor del 25 % de su masa se fusionó en helio. Cuando se mide la proporción de helio en el gas intergaláctico distante mediante el análisis de su espectro con un telescopio, ¡se obtiene un… 25 %! Este hallazgo me parece tan impactante como el descubrimiento de un fémur fosilizado de *Tyrannosaurus rex*: un signo directo de que en el pasado ocurrieron hechos alucinantes, en este caso, una señal de que todo se encontraba a una temperatura tan elevada como la que impera en el centro del Sol. Y el helio no es el único resto fósil. La nucleosíntesis primordial, tal como acabó conociéndose la teoría de Gamow, también predice que aproximadamente uno de cada 300 000 átomos de ahí fuera debería ser de deuterio**[9]** y alrededor de uno de cada 5000 millones de átomos debería ser de litio. Estas dos fracciones se han medido ahora, y concuerdan a la perfección con la predicción teórica.

La Gran Explosión en peligro

No obstante, el éxito no fue fácil de alcanzar: la Gran Explosión caliente de Gamow recibió una acogida muy fría. De hecho, el término Gran Explosión (en inglés *Big Bang*) lo acuñó uno de sus detractores, Fred Hoyle, con la intención de ridiculizarlo. De acuerdo con los marcadores de 1950, la teoría había emitido dos grandes predicciones, y ambas erróneas: la edad de este universo y la abundancia de átomos. La medición inicial de Hubble de la expansión cósmica pronosticaba que el universo tenía menos de dos mil millones de años de edad, y a los geólogos los deprimía la idea de que el universo fuera más reciente que algunas de sus rocas. Es más, Gamow, Alpher y Herman confiaban en que la nucleosíntesis primordial produjera la práctica *totalidad* de los átomos que nos rodean en la proporción correcta, pero se encontraron con que ni de lejos se llegaba a crear suficiente carbono, oxígeno y otros átomos frecuentes, sino que tan solo se obtenía helio, deuterio y cantidades exiguas de litio. Ahora sabemos que Hubble subestimó en extremo la distancia de las galaxias. Por eso concluyó erróneamente que este universo se expande siete veces más deprisa que en la realidad, lo que llevaba

a concluir que era siete veces más joven. Cuando en la década de 1950 mejoró la medición de distancias y empezó a corregirse este error, los desdichados geólogos recuperaron la credibilidad y la serenidad.

El segundo «error» de la teoría de la Gran Explosión también se esfumó por entonces. Gamow había realizado investigaciones pioneras sobre reacciones de fusión en estrellas, y tanto su trabajo como el de otros apuntaban a que las estrellas producen helio y poco más, tal como hace el Sol en estos instantes. Por eso confiaba en que la nucleosíntesis primordial explicara la procedencia de los demás átomos. Sin embargo, en la década de 1950 se descubrió una coincidencia físico-nuclear en apariencia sorprendente que relacionaba niveles de energía nuclear del helio, el berilio, el carbono y el oxígeno, lo que facilitaba la fusión. Fred Hoyle fue el primero en apreciar que esta coincidencia permitía que las estrellas moribundas transformaran helio en carbono, oxígeno y la mayoría del resto de átomos que nos conforman. Es más, quedó clarísimo que las estrellas mueren con explosiones que reciclan muchos de los átomos que han generado en nubes de gas que con posterioridad pueden volver a crear estrellas nuevas, planetas y, a la larga, entes como usted y yo. En otras palabras, estamos más conectados con el cielo de lo que pensaban nuestros ancestros: estamos hechos de materia estelar. Igual que estamos en este universo, este universo está en nosotros. Este planteamiento hizo que la nucleosíntesis primordial de Gamow pasara de ser un fracaso a convertirse en un éxito aplastante: nuestro universo fabricó helio y una pizca de deuterio y litio durante los primeros minutos de su existencia, y más tarde las estrellas crearon el resto de nuestros átomos[10].

Se había resuelto el enigma del origen de los átomos. Y esta vez llovió sobre mojado: justo cuando la teoría de la Gran Explosión empezaba a cobrar aceptación, el descubrimiento en el año 1964 de la otra predicción de Gamow electrizó el mundo de la cosmología: el resplandor de la Gran Explosión, la radiación del fondo cósmico de microondas.

¿Qué es en realidad una Gran Explosión?

Ya hemos replegado los límites del conocimiento hasta unos catorce mil millones de años atrás, un tiempo en el que todo nuestro universo era un reactor de fusión nuclear abrasador. Cuando digo que creo en la hipótesis de la Gran Explosión, me refiero a que estoy convencido de que ocurrió, pero nada más.

> **Hipótesis de la Gran Explosión:** Todo lo observable estuvo una vez a una temperatura mayor que el núcleo del Sol, y experimentó una expansión tan veloz que dobló su tamaño en menos de un segundo.

Sin duda fue una explosión lo bastante grande como para llamarla Gran Explosión con mayúsculas. Sin embargo, conviene tener en cuenta que esta definición mía es bastante cautelosa, puesto que no dice nada en absoluto sobre lo que pasó antes de eso. Por ejemplo, esta hipótesis *no* implica que nuestro universo tuviera un segundo de edad en aquel instante, ni que alguna vez haya sido infinitamente denso, ni que saliera de alguna suerte de singularidad donde nuestras matemáticas dejan de funcionar. La pregunta ¿hay indicios de una singularidad en la Gran Explosión?, del capítulo anterior tiene una respuesta muy simple: *¡No!* No hay duda de que si extrapolamos las ecuaciones de Fridman todo lo posible hacia el pasado, se derrumban en una singularidad infinitamente densa alrededor de un segundo antes de la nucleosíntesis primordial, pero la teoría de la mecánica cuántica que exploraremos en el capítulo 7 dice que esa extrapolación pierde sentido antes de llegar a la singularidad. Considero crucial diferenciar entre aquello sobre lo que tenemos pruebas sólidas, y lo que es muy especulativo y, aunque contamos con algunas teorías e indicios sobre lo que sucedió antes de la Gran Explosión, en lo que ahondaremos en el capítulo 5, la verdad es que aún no lo sabemos. Ahí se sitúan los límites actuales de nuestro conocimiento. De hecho, ni siquiera sabemos con certeza si el universo tuvo algún comienzo, en lugar de pasarse una eternidad haciendo algo que no hemos desentrañado antes de la nucleosíntesis primordial.

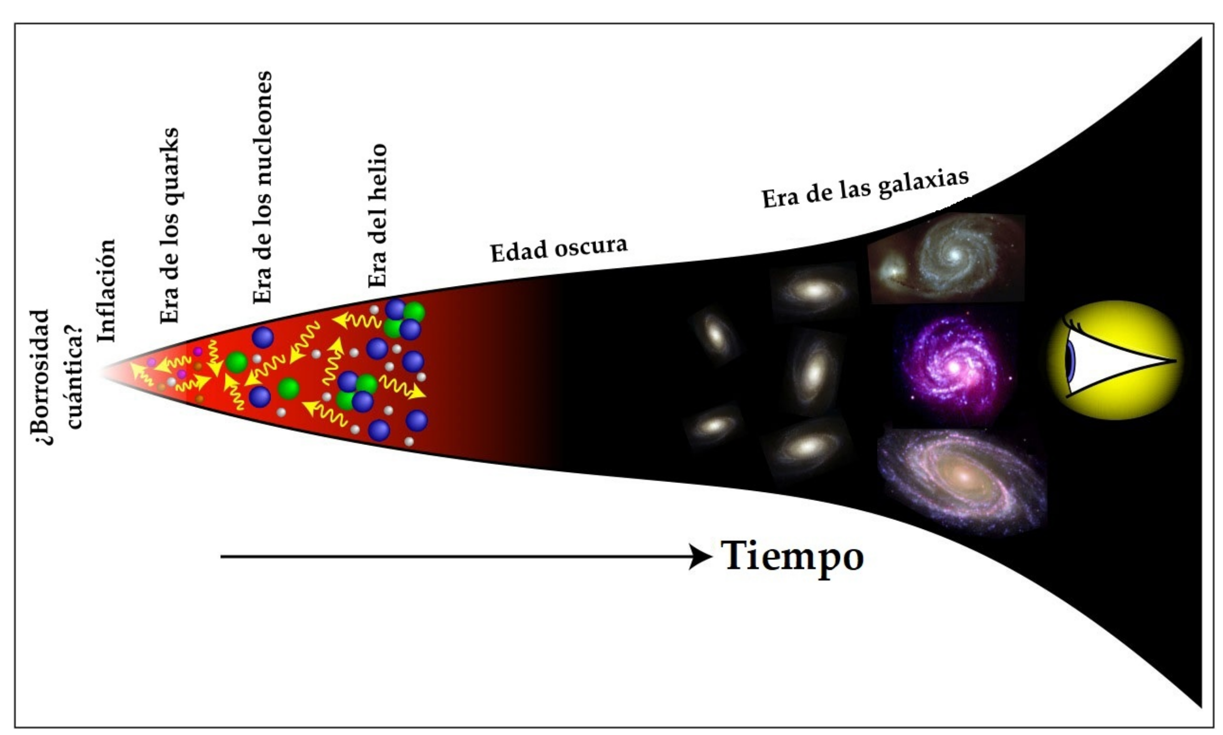


Figura 3.7: Aunque sabemos muy poco acerca de nuestros orígenes últimos, conocemos bastante bien qué sucedió durante los catorce mil millones de años posteriores. A medida que este universo se fue expandiendo y enfriando, los quarks se ensamblaron en protones (núcleos de hidrógeno) y neutrones, que a su vez se fusionaron en núcleos de helio. Después, esos núcleos formaron átomos mediante la captación de electrones, y la gravitación concentró esos átomos en las galaxias, estrellas y planetas que observamos en la actualidad.

En resumen, los humanos hemos desplazado la frontera del conocimiento muy atrás en el tiempo hasta desvelar la historia que he intentado ilustrar en la figura 3.7. Un millón de años después de la Gran Explosión el espacio estaba lleno de gas transparente casi uniforme. Si pudiéramos rebobinar el gran teatro del cosmos, veríamos que ese gas se calienta cada vez más y sus átomos chocan entre sí cada vez con más intensidad hasta descomponerse en núcleos atómicos y electrones libres: un plasma. Después veríamos que las colisiones entre los átomos de helio los separan en protones y neutrones. A continuación, los choques entre estos últimos los escindirían en sus componentes esenciales: en quarks. Más allá cruzamos los límites de nuestros conocimientos y nos adentramos en el reino de la especulación científica (en el capítulo 5 analizaremos lo que en la figura 3.7 aparece etiquetado como «inflación» y «borrosidad cuántica»). Si damos un salto atrás hasta un millón de años después de la Gran Explosión y, por el contrario, reproducimos la historia hacia delante, vemos que la gravitación amplifica las ligeras acumulaciones del gas hasta crear galaxias, estrellas y la rica estructura cósmica que observamos hoy día a nuestro alrededor.

Pero la gravitación solo puede amplificar pequeñas fluctuaciones en fluctuaciones mayores, no puede crear fluctuaciones a partir de la nada. Si hay algo liso y uniforme, la gravitación lo mantendrá así para siempre, incapaz de crear ninguna acumulación densa y mucho menos galaxias. Esto significa que desde bien pronto tuvo que haber pequeñas fluctuaciones primordiales que la gravitación amplificó y que actuaron como una especie de semillas cósmicas que determinaron dónde se formarían las galaxias. ¿De dónde salieron esas fluctuaciones primordiales? En otras palabras, sabemos de dónde provienen los átomos de nuestro universo, pero ¿y los imponentes patrones de galaxias en los que se organizaron? ¿De dónde salió la estructura cósmica a gran escala? Creo que esta pregunta se ha convertido en la más productiva de las muchas que nos hemos planteado en cosmología. En los próximos dos capítulos, veremos por qué.

SUMARIO

- Como la luz distante tarda tiempo en alcanzarnos, los telescopios nos permiten ver el desarrollo de la historia del cosmos.
- Unos catorce mil millones de años atrás todo lo observable en la actualidad estaba a una temperatura más elevada que el núcleo del Sol y se expandió tan rápidamente que duplicó su tamaño en menos de un segundo; esto es lo que yo llamo la Gran Explosión.
- Aunque no sabemos qué sucedió con anterioridad, conocemos muchos detalles sobre lo que pasó desde entonces: expansión y formación de estructuras.
- Este universo tardó varios minutos en convertirse en un reactor de fusión nuclear gigantesco, como el núcleo del Sol, que transformó hidrógeno en helio y otros elementos ligeros, hasta que la expansión cósmica diluyó y enfrió lo suficiente nuestro universo como para detener la fusión.
- Al realizar los cálculos se llega a la predicción de que alrededor del 25 % del hidrógeno se transformó en helio; las mediciones concuerdan a la perfección con esta predicción y también encajan con las predicciones para otros elementos ligeros.
- Tras otros cuatrocientos mil años de expansión y disolución, este plasma de hidrógeno-helio se enfrió y se convirtió en gas transparente. Esta transición se ve como una pared de plasma distante cuyo tenue fulgor ha recibido el nombre de fondo cósmico de microondas y condujo a dos premios Nobel.

- A lo largo de los miles de millones de años subsiguientes, la gravitación hizo que aquel universo uniforme y aburrido se transformara en un cosmos granulado e interesante mediante la amplificación de las diminutas fluctuaciones de densidad que se observan en el fondo cósmico de microondas hasta formar planetas, estrellas, galaxias y la estructura cósmica a gran escala que observamos hoy en día a nuestro alrededor.
- La expansión cósmica predice que las galaxias distantes se alejan de nosotros de acuerdo con una fórmula sencilla que concuerda con lo que se observa en la realidad.
- Toda esta historia de nuestro universo la describen con exactitud fórmulas físicas simples que permiten predecir el futuro a partir del pasado, y el pasado a partir del futuro.
- Todas esas leyes físicas que gobiernan la historia de este universo se expresan en términos de ecuaciones matemáticas, así que la descripción más exacta de nuestra historia cósmica es una descripción matemática.

4
Nuestro universo en números

Los cosmólogos se equivocan a menudo, pero nunca dudan.

Lev Landau

En teoría, la teoría y la práctica son lo mismo. En la práctica, no lo son.

Albert Einstein

«¡Vaya!». Allí estaba yo, de pie junto a la carretera, pasmado y completamente mudo. Lo había mirado todos los días de mi vida, pero en realidad nunca lo había visto. Eran alrededor de las cinco de la madrugada y había decidido salir de la autopista que atraviesa Arizona para consultar el mapa, cuando de repente se me vino encima: ¡el firmamento! Aquel no era el mismo cielo pobre y repleto de contaminación lumínica de Estocolmo bajo el que crecí, en el que solo se vislumbraban el Carro y unas cuantas estrellas más, débiles y dispersas. Fue algo espectacular y sobrecogedor: miles de puntos brillantes de luz creaban preciosos y enrevesados dibujos, y la Vía Láctea fulguraba como una autopista galáctica grandiosa que cruzaba todo el cielo.

El aire seco del desierto y la altitud a más de dos kilómetros sobre el nivel del mar realzaban el espectáculo que contemplé, pero sospecho que también usted se ha alejado lo bastante alguna vez de las luces de la ciudad como para abrumarse con el cielo. ¿Y qué es exactamente lo que nos maravilla? En parte las estrellas mismas, sin duda, y la inmensidad de todo ello. Pero hay algo más: las *figuras*. Despertaron tal curiosidad en nuestros ancestros que inventaron mitos para explicarlas, y algunas culturas las imaginaron agrupadas en constelaciones que representaban personajes mitológicos. Es evidente que las estrellas no exhiben una distribución uniforme en el firmamento, como los lunares de una tela, sino que parecen agrupadas. La mayor figura que contemplé aquella noche formada por una acumulación de estrellas fue la Vía Láctea, nuestra Galaxia vista desde dentro, y los

telescopios nos han desvelado que también las galaxias se concentran en figuras complejas que conforman grupos, cúmulos de galaxias, y enormes estructuras filamentosas que abarcan cientos de millones de años-luz. ¿De dónde salieron estas concentraciones? ¿Cuál es el origen de esta imponente estructura cósmica?

El análisis de los efectos desestabilizadores de la gravitación al final del primer capítulo también nos condujo a preguntarnos por el origen de la estructura cósmica a gran escala. En otras palabras, el intelecto nos guió hasta la misma pregunta que nos plantean las emociones cuando nos invade el asombro al contemplar el firmamento: ¿De dónde salió la estructura? Este es el gran misterio en el que indagaremos en este capítulo.

Se busca: cosmología de precisión

Tal como vimos en el capítulo anterior, la humanidad aún no conoce los orígenes últimos de este universo; en concreto, qué sucedió antes de aquel instante en que nuestro universo era un reactor nuclear descomunal y multiplicó su tamaño por dos en menos de un segundo. Sin embargo, ahora sabemos mucho sobre lo que ocurrió durante los catorce mil millones de años transcurridos desde entonces: *expansión* y *formación de estructuras*. Estos dos procesos básicos, ambos controlados por la gravitación, han transformado aquel caldo caliente y homogéneo de quarks en el cosmos repleto de estrellas de hoy. En la historia de nuestro universo que reprodujimos en el capítulo anterior a cámara rápida, vimos que la expansión gradual diluyó y enfrió las partículas elementales, lo que les permitió concentrarse en estructuras cada vez mayores como núcleos atómicos, átomos, moléculas, estrellas y galaxias. Se conocen cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, y tres de ellas se han turnado para desencadenar este proceso de formación de estructuras: primero, la fuerza nuclear fuerte unió los núcleos, después la fuerza electromagnética creó los átomos y las moléculas y, por último, la gravitación creó las inmensas estructuras que adornan nuestro cielo nocturno.

¿De qué manera exacta hizo eso la gravitación? Cuando paramos con la bici en un semáforo en rojo, enseguida notamos que la gravedad nos desestabiliza: inevitablemente empezamos a bascular hacia los lados, y hay que poner un pie en el suelo para no caer. La esencia de la inestabilidad estriba en la amplificación de fluctuaciones pequeñas. En el caso de la bicicleta que se detiene, cuanto más nos apartamos del equilibrio, con más

fuerza nos empujará la gravedad en la mala dirección. En el ejemplo cósmico, cuanto más se aparta este universo de la uniformidad perfecta, con más fuerza amplifica la gravitación las acumulaciones. Si una región del espacio es algo más densa que el entorno, la gravitación atraerá material circundante y la volverá más densa aún. Eso incrementará aún más su atracción y, por tanto, captará masa con mayor rapidez incluso. De la misma manera que tener mucho dinero facilita hacer más dinero, es más fácil conseguir más masa cuando ya hay mucha. Catorce mil millones de años fueron un periodo de tiempo lo bastante amplio como para que esta inestabilidad gravitatoria hiciera que nuestro universo pasara de anodino a interesante, y hasta amplificara fluctuaciones minúsculas de densidad en gigantescos conglomerados compactos como las galaxias.

Aunque este esquema básico de expansión y formación de estructuras se había concretado durante las décadas previas, los detalles seguían sin conocerse bien cuando empecé los estudios de posgrado en 1990 y descubrí la cosmología. Aún se discutía si la edad de nuestro universo ascendía a diez mil millones o a veinte mil millones de años, lo que revela que seguía abierto el largo debate sobre la velocidad a la que se está expandiendo en la actualidad, y la incógnita más difícil de esclarecer aún de a qué velocidad se había expandido en el pasado. La cuestión de la formación de estructuras era aún más confusa, porque las tentativas para conseguir una concordancia detallada entre la teoría y la observación fueron revelando poco a poco ¡que no teníamos ninguna pista sobre qué componía el 95 % de este universo! Una vez que el experimento del *COBE* midió anisotropías del 0,002 % cuatrocientos mil años después de la Gran Explosión, quedó claro que la gravitación no habría tenido tiempo de amplificar esas ligeras acumulaciones hasta crear la estructura cósmica a gran escala de hoy, a menos que alguna forma invisible de materia aportara un tirón gravitatorio adicional.

Esta misteriosa materia se denomina *materia oscura*, lo cual no es más que una designación para ponerle nombre a nuestra ignorancia, en realidad. Sería más adecuado llamarla *«materia invisible»* porque, más que oscura, es transparente y puede traspasarnos la mano sin que lo notemos. De hecho, la materia oscura que choca contra la Tierra suele atravesar todo el planeta sin que le afecte en absoluto y emerger indemne por el otro lado. Por si la materia oscura no fuera lo bastante demencial de por sí, se introdujo una segunda sustancia enigmática apodada *energía oscura* para que las predicciones teóricas concordaran con la expansión y la estructura observadas. Se dio por supuesto que repercutía en la expansión cósmica sin poseer ninguna

estructura propia, es decir, manteniéndose perfectamente uniforme en todo momento.

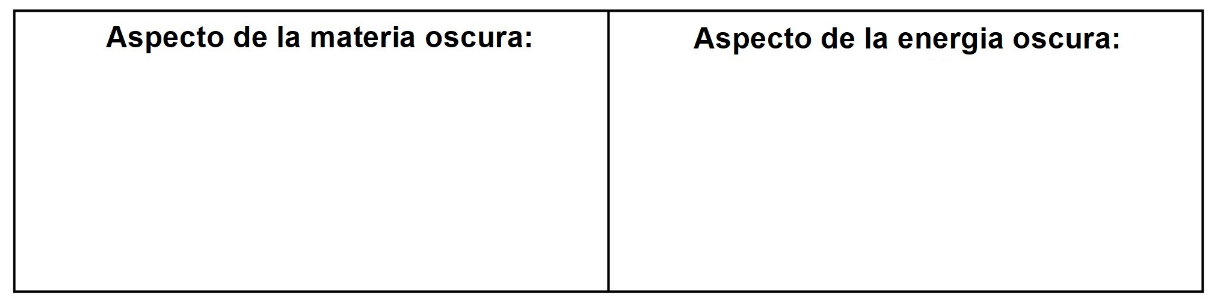


Figura 4.1: Tanto la materia oscura como la energía oscura son invisibles, lo que significa que se niegan a interaccionar con la luz y otros fenómenos electromagnéticos. Sabemos de su existencia únicamente por sus efectos gravitatorios.

Tanto la materia oscura como la energía oscura habían tenido una historia larga y controvertida. La candidata más simple para energía oscura era la llamada *constante cosmológica*, el factor chapuza ya mencionado que introdujo Einstein en su teoría de la gravitación y que más tarde calificaría como su mayor error. Friz Swicky propuso la materia oscura en 1934 para explicar el empuje gravitatorio adicional que impide que los cúmulos de galaxias se escindan, y Vera Rubin descubrió en la década de 1960 que las galaxias espirales rotan tan deprisa que también ellas se desmembrarían a menos que contuvieran masa invisible con una gravitación suficiente para mantenerlas cohesionadas. Estas ideas chocaron contra un escepticismo considerable: si estamos dispuestos a atribuir fenómenos inexplicables a entidades invisibles y a la vez capaces de atravesar las paredes ¿no tendríamos que empezar a creer también, ya que estamos, en los fantasmas? Además, existía un precedente preocupante: en la Grecia antigua, cuando Tolomeo reparó en que las órbitas planetarias no son circunferencias perfectas, preparó una teoría compleja en la que seguían circunferencias menores (llamadas *epiciclos*) que a su vez se movían en círculo. Tal como vimos con anterioridad, el descubrimiento ulterior de una ley de la gravitación más precisa erradicó los epiciclos con la predicción de que las órbitas no son circulares, sino elípticas. Tal vez la necesidad de la materia y la energía oscuras pueda eliminarse, igual que los epiciclos, con el hallazgo de una ley de la gravitación aún más precisa. ¿Podría de verdad tomarse en serio la cosmología moderna?

Esta es la clase de interrogantes que nos planteábamos mientras cursaba los estudios de posgrado. Responderlos requería mediciones mucho mejores para que la cosmología dejara de ser la materia especulativa y ávida de datos

que era y se transformara en una ciencia de precisión. Por suerte, eso fue exactamente lo que pasó.

Fluctuaciones de precisión en el fondo de microondas

Como hemos visto en la figura 3.6, la imagen de nuestro universo primordial elaborada mediante un experimento con el fondo cósmico de microondas se puede descomponer en una suma de numerosos mapas complementarios diferentes llamados *multipolares* que, en esencia, contienen la aportación de regiones de distintos tamaños. La figura 4.2 reproduce en forma de gráfica la cantidad total de fluctuación en cada uno de esos multipolos; esta curva recibe el nombre de *espectro de potencias* del fondo de microondas, y codifica la información cosmológica clave que figura en el mapa. Al mirar un mapa celeste como el de la figura 3.4 se ven manchas de tamaños muy diversos, igual que las de un dálmata: algunas manchas abarcan alrededor de un grado de cielo, mientras que otras cubren dos grados, etc. El espectro de potencias codifica información sobre cuántas manchas hay de cada tamaño.

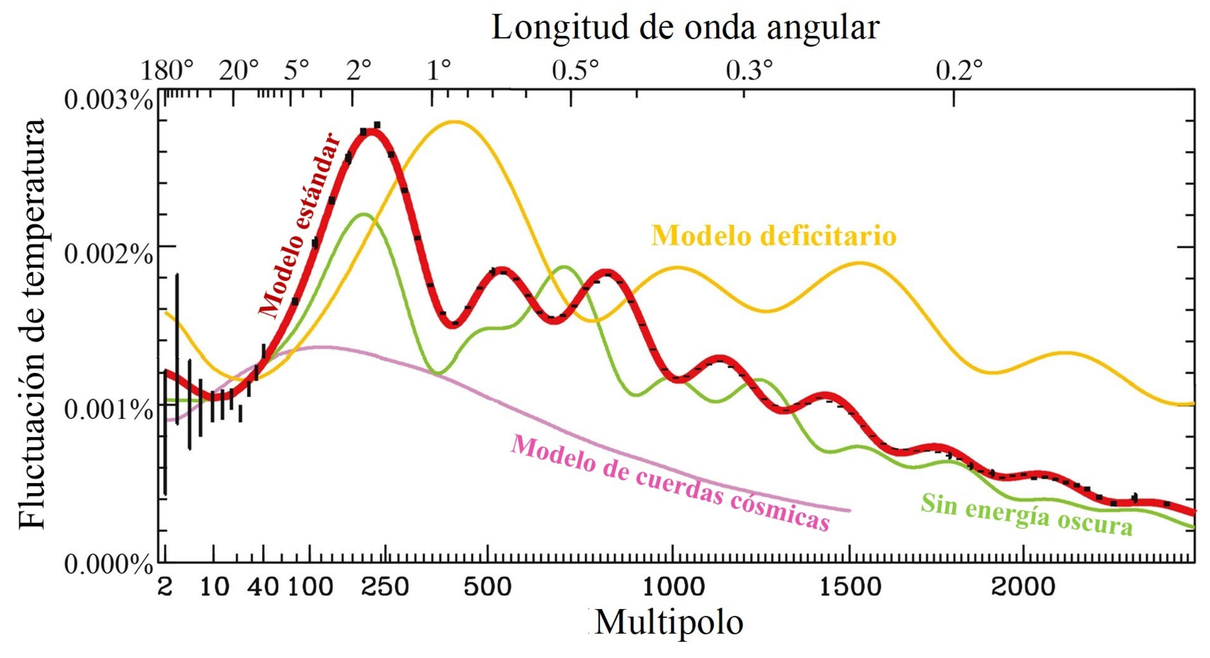


Figura 4.2: Las mediciones de precisión que se han realizado para valorar cómo dependen de la escala angular las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas han descartado por completo muchos modelos teóricos que gozaron de popularidad en el pasado, pero concuerdan estupendamente con la curva predicha para el modelo estándar actual. Aquí se puede apreciar el rasgo más destacado de la cosmología moderna sin preocuparse por ninguno de los detalles: ahora disponemos de mediciones muy precisas, y concuerdan con la predicción teórica.

Lo más fascinante del espectro de potencias es que no solo se puede medir, sino que también se puede predecir: se puede calcular con exactitud qué espectro de potencias le correspondería a cualquier modelo definido matemáticamente para describir cómo se produjo la expansión y la formación de estructuras en este universo. Tal como se ve en la figura 4.2, las predicciones difieren mucho de un modelo a otro: de hecho, las mediciones actuales han descartado más allá de cualquier duda razonable todos los modelos teóricos de la figura 4.2, salvo uno, a pesar de que cuando yo cursaba los estudios de posgrado había al menos un colega reputado defendiendo como correcto cada uno de esos modelos eliminados. La forma prevista del espectro de potencias depende de varias maneras complejas de todos los aspectos que repercuten en la formación de estructuras cósmicas (incluida la densidad de átomos, la densidad de materia oscura, la densidad de energía oscura y la naturaleza de las fluctuaciones primordiales), así que, si podemos corregir nuestras suposiciones sobre todos estos asuntos de forma que la predicción encaje con las mediciones, entonces no solo habremos encontrado un modelo válido, sino que también habremos medido estas cantidades físicas importantes.

Telescopios y computadoras

Cuando oí hablar por primera vez del fondo cósmico de microondas durante los estudios de posgrado, no existían mediciones de ninguna clase del espectro de potencias. Más tarde, el equipo del *COBE* nos brindó la primera aproximación a esta curva serpenteante y esquiva que en su extremo izquierdo alcanzaba una altura aproximada del 0,001 % y cuya pendiente en esa zona era más o menos horizontal. Los datos del *COBE* contenían más información sobre el espectro de potencias, pero nadie la había explotado porque habría implicado tediosas manipulaciones de una tabla de números llamada *matriz*, que ocupaba 31 megabytes. Aunque se trate de una cantidad irrisoria hoy en día, puesto que equivale al tamaño de un pequeño vídeo en cualquier teléfono móvil, en 1992 era abrumadora. Así que mi compañero de clase Ted Bunn y yo ideamos un plan secreto: el profesor Marc Davis, de nuestro departamento, disponía de una computadora apodada «Magicbean»[11] que tenía más de 32 megabytes de memoria, y una noche tras otra me dediqué a encenderlo de madrugada, cuando no llamaba la atención de nadie, y lo ponía a analizar nuestros datos. Varias semanas después de este procesamiento clandestino e ilícito de números, publicamos un artículo con las mediciones más precisas existentes hasta la fecha sobre la forma del espectro de potencias.

Con este proyecto me di cuenta de que, igual que los telescopios habían transformado una vez la astronomía, el espectacular avance de la tecnología informática tenía la capacidad de elevarla a un nivel aún mayor. De hecho, cualquier ordenador personal de hoy en día está tan mejorado con respecto a los de entonces, que repetiría todos aquellos cálculos que realicé con Ted en cuestión de minutos. Así que decidí que si los científicos experimentales estaban dedicando tantos esfuerzos a recopilar datos sobre nuestro universo, la gente como yo tenía el deber de exprimir esos datos hasta sacarles el máximo rendimiento. Y ese fue el objetivo central de mi trabajo a lo largo de la siguiente década.

Un tema que me obsesionó fue cómo medir de la mejor manera posible el espectro de potencias. Había métodos rápidos que adolecían de imprecisiones y otros problemas. Y luego estaba el método óptimo, desarrollado por mi amigo Andrew Hamilton, que por desgracia requería una cantidad de tiempo de computación que crecía con la sexta potencia del número de píxeles existentes en el mapa del cielo, así que para medir el espectro de potencias a partir del mapa del *COBE* se necesitaría más tiempo que la propia edad de este universo.

El 21 de noviembre de 1996 reina la paz y la oscuridad en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey, donde me encuentro pasando otra noche de locura en el despacho. Estoy entusiasmado con la idea de sustituir la sexta potencia del método de Andrew Hamilton por la tercera potencia, lo que me permitiría obtener una medición óptima del espectro de potencias del *COBE* en menos de una hora, y estoy bregando para acabar el artículo a tiempo para un congreso en Princeton al día siguiente. En la comunidad física exponemos todos nuestros artículos en un sitio de Internet de acceso libre, **http://arXiv.org**, en cuanto los concluimos para que los colegas puedan leerlos antes de que se queden atascados en el proceso de arbitraje y publicación. El problema era que yo tenía la terrible costumbre de exhibir mis artículos *antes* de terminarlos, justo después de que finalizara el plazo de presentación de cada jornada. De esta manera figuraba el primero en la lista de artículos del día siguiente. Lo malo era que, si no conseguía acabarlo en veinticuatro horas, me exponía a la humillación pública de haber mostrado al mundo un borrador inconcluso que quedaría como monumento perpetuo a mi estupidez. Esta vez mi estrategia acabó en fracaso, porque los madrugadores de Europa accedieron a la maraña incompleta que figuraba en mi apartado de discusión antes de que lo acabara por fin hacia las cuatro de la madrugada. Dentro del congreso, mi amigo Lloyd Knox presentó un método

similar que había desarrollado junto con Andrew Jaffe y Dick Bond en Toronto, aunque aún no lo había redactado para publicarlo. Cuando yo presenté mis resultados, Lloyd sonrió y le dijo a Dick: «¡Tegmark, el de los dedos vertiginosos!». Cada uno de aquellos métodos resultó bastante útil y desde entonces se han usado para casi todas las mediciones del espectro de potencias del fondo de microondas. Parece que Lloyd y yo seguimos sendas vitales paralelas: tenemos las mismas ideas al mismo tiempo (de hecho, él se me había adelantado con anterioridad en el desarrollo de una fórmula fantástica para tratar el ruido en los mapas del fondo de microondas), tuvimos dos hijos al mismo tiempo y hasta nos divorciamos a la vez.

Una mina de oro

El avance de los experimentos, los ordenadores y los métodos fue mejorando las mediciones de la curva del espectro de potencias de la figura 4.2. Tal como se ve en ella, se predijo que la curva tendría que parecerse un tanto a las suaves colinas de California, con una serie de picos pronunciados. Si medimos muchos dogos, caniches y chihuahuas y plasmamos su distribución por tamaños sobre una gráfica, obtendremos una curva con tres picos. De manera análoga, si medimos gran cantidad de manchas del fondo cósmico de microondas, tal como muestra la figura 3.4, y representamos su distribución por tamaños, encontraremos que determinamos tamaños de manchas especialmente comunes. El pico más extremo de la figura 4.2 se corresponde con manchas de alrededor de un grado de tamaño angular. ¿Por qué? Pues porque esas manchas se deben a ondas sonoras que se propagan por el plasma cósmico a velocidades cercanas a la de la luz, así que, como el plasma existe desde unos cuatrocientos mil años después de la Gran Explosión, las manchas han crecido hasta alcanzar un tamaño aproximado de cuatrocientos mil años-luz. Si se calcula el tamaño angular que cubriría en el cielo una mancha de cuatrocientos mil años-luz en la actualidad, catorce mil millones de años después, se obtiene que abarcaría un grado. A menos que el espacio sea curvo, es decir…

Tal como dijimos en el capítulo 2, existe más de un tipo de espacio tridimensional uniforme: además del tipo plano que axiomatizó Euclides y que todos aprendimos en la escuela, también hay espacios curvos donde los ángulos responden a leyes distintas. En el colegio aprendí que los ángulos de un triángulo trazado sobre una hoja plana de papel suman 180 grados. Pero si se traza sobre la superficie curva de una naranja, sumarán más de 180 grados, y si se dibuja sobre una silla de montar a caballo, sumarán menos que eso

(véanse los ejemplos de la figura 2.7). De manera similar, si el espacio físico en el que nos hallamos fuera curvo como una superficie esférica, el ángulo que cubriría cada mancha del fondo de microondas sería mayor, y desplazaría hacia la izquierda los picos en la curva del espectro de potencias, mientras que si el espacio tuviera una curvatura como la de una silla de montar, las manchas se verían menores y los picos se desplazarían hacia la derecha.

Una de las ideas que más me gustan de la teoría de la gravitación de Einstein es que la geometría no es tan solo matemáticas, también es física. En concreto, las ecuaciones de Einstein revelan que cuanta más materia contenga el espacio, más se curva. Esta curvatura del espacio provoca que los objetos no se desplacen en línea recta, sino siguiendo un movimiento que se deforma hacia los objetos masivos, lo que explica la gravitación como una manifestación de la geometría. Esto inaugura una manera completamente nueva de interpretar este universo: ¡basta con medir el primer pico del espectro de potencias del fondo cósmico de microondas! Si su ubicación indica que el espacio es plano, entonces las ecuaciones de Einstein establecen que la densidad media del cosmos tiene un valor en torno a 10^{-26} kg/m^3, lo que equivale a unos 10 miligramos por cada volumen igual al de la Tierra, o unos seis átomos de hidrógeno por metro cúbico. Si el pico aparece más desplazado hacia la izquierda, la densidad es mayor, y viceversa. Dada la confusión existente en relación con la materia oscura y la energía oscura, la medición de esta densidad total cobró una relevancia inmensa, y los equipos de experimentación de todo el mundo iniciaron una carrera para localizar el primer pico (que se consideraba el más fácil de detectar, porque las manchas grandes se miden con más facilidad que las pequeñas).

La primera vez que vi ese pico fue en 1996, en un artículo encabezado por un alumno de Lyman Page llamado Barth Netterfield, que usó los datos Saskatoon. «¡Vaya!», pensé, y me vi obligado a soltar la cucharada de muesli muniquense para asimilarlo. A un nivel cerebral, la teoría que subyacía a los picos del espectro de potencias era muy elegante y todo eso, pero en mi interior seguía sintiendo que nuestras extrapolaciones humanas no podían funcionar tan bien. Tres años más tarde, Amber Miller, alumno de Lyman Page, dirigió otra medición más precisa del primer pico, y descubrió que caía casi en el lugar correspondiente al previsto para un universo plano, pero por alguna razón seguí teniendo la sensación de que era demasiado bueno para ser cierto. Al final, en abril del año 2000, no tuve más remedio que aceptarlo. Un telescopio de microondas llamado *Boomerang* había circunnavegado la Antártida durante once días suspendido de un globo a gran altitud del tamaño

de un campo de fútbol, y había tomado las mediciones más precisas, con gran diferencia, disponibles hasta la fecha. Los datos revelaron un precioso primer pico situado en la posición exacta de un universo plano. Así que ya conocíamos la densidad total de este universo (promediada en todo el espacio).

Energía oscura

Aquella medición reveló una situación interesante en relación con la cantidad de materia cósmica que existe. Tal como se ve en la figura 4.3, conocemos la dimensión de la cantidad total a partir de la posición del primer pico, pero también conocemos la densidad de la materia ordinaria, así como la de materia oscura, a partir de la medición de sus efectos gravitatorios en la formación de estructuras cósmicas. Pero toda esa materia solo asciende al 30 % del total, lo que significa que el 70 % restante debe de consistir en alguna forma de materia que no se agrega, carente de estructura, lo que se denomina *energía oscura*.

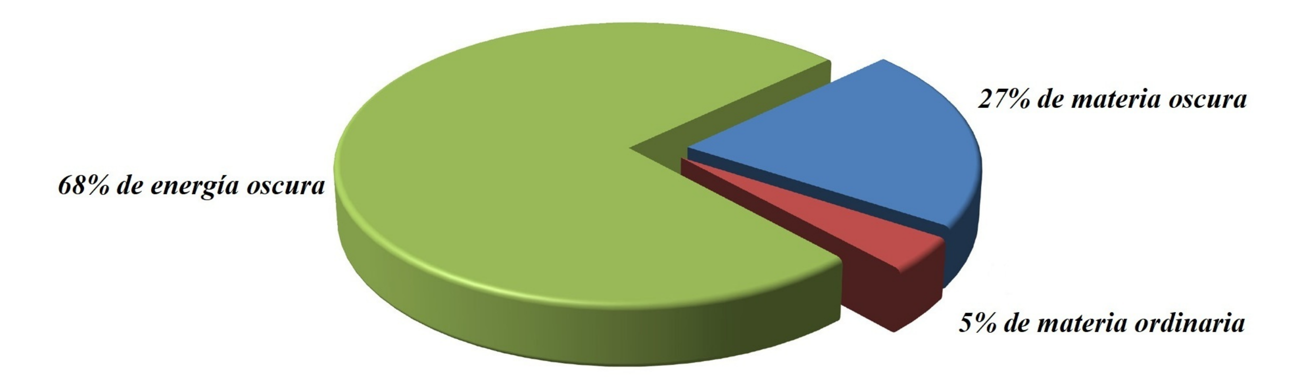


Figura 4.3: La abundancia de materia cósmica. La posición horizontal de los picos del espectro de potencias del fondo de microondas indica que el espacio es plano y que la densidad cósmica total es alrededor de un quintillón de veces (10^{30}) menor que la del agua (promediada en todo nuestro universo). La altura de los picos revela que la materia ordinaria y la oscura tan solo conforman alrededor del 30 % de su densidad, de modo que el 70 % restante debe de consistir en otra cosa (energía oscura).

Lo más impresionante de lo que acabo de decir es lo que no he dicho: la palabra *supernova*. Porque indicios completamente independientes de la energía oscura, basados en la expansión cósmica en lugar de la estructura cósmica, apuntan hacia una abundancia de energía oscura idéntica, del 70 %. Ya hemos hablado del empleo de las variables cefeidas como patrones de luminosidad para medir distancias cósmicas. Los cosmólogos contamos ahora con otro patrón de luminosidad aún más brillante en la caja de herramientas, un patrón que no solo se ve a una distancia de millones de años-luz, sino

también a miles de millones. Se trata de las descomunales explosiones cósmicas conocidas como supernovas de tipo Ia, que durante unos cuantos segundos llegan a liberar más energía que 100 000 billones de soles.

¿Recuerda usted cómo acaba la primera estrofa del poema «Twinkle, Twinkle, Little Star»? Cuando Jane Taylor escribió «Up above the world so high,/Like a diamond in the sky»[12], no tenía ni idea de cuánto acertaba: cuando el Sol se extinga dentro de unos cinco mil millones de años, acabará convertido en lo que se llama una enana blanca, que es una esfera gigantesca formada en su mayoría (al igual que los diamantes) de átomos de carbono. Este universo rebosa hoy en día de enanas blancas creadas por estrellas pretéritas. Muchas de ellas ganan peso de manera progresiva engullendo gas de estrellas compañeras moribundas alrededor de las cuales orbitan. Cuando se vuelven oficialmente obesas (lo que sucede cuando alcanzan 1,4 veces la masa del Sol), sufren el equivalente estelar a un infarto: se vuelven inestables y experimentan una explosión termonuclear colosal, se convierten en supernovas de tipo Ia. Como todas estas bombas cósmicas tienen, pues, la misma masa, no es de extrañar que posean una potencia casi idéntica.

Es más, se ha demostrado que las ligeras variaciones en la potencia explosiva guardan relación tanto con el espectro del estallido como con la rapidez con que el astro aumenta de brillo y palidece después, todo lo cual es mensurable y permite convertir las supernovas de tipo Ia en patrones de luminosidad.

Esta técnica la emplearon Saul Perlmutter, Adam Riess, Brian Schmidt, Robert Kirshner y sus colaboradores para medir con exactitud las distancias de gran cantidad de supernovas Ia y, también, a qué velocidad se alejan de nosotros de acuerdo con su desplazamiento hacia el rojo. A partir de esos datos desarrollaron la reconstrucción más exacta hasta la fecha de la velocidad que ha tenido la expansión de este universo en distintas épocas del pasado, y en 1998 anunciaron un hallazgo sorprendente que les valió el Premio Nobel de 2011 en Física: tras pasar los primeros siete mil millones de años frenándose, la expansión cósmica empezó a acelerarse de nuevo ¡y así ha continuado desde entonces! Si lanzamos una piedra al aire, el tirón de la gravedad terrestre frenará su alejamiento del suelo, del mismo modo la aceleración cósmica evidenció una fuerza gravitatoria extraña que no es de atracción, sino de repulsión. Tal como explicaré en el próximo capítulo, la teoría de la gravitación de Einstein predice que la energía oscura tiene justamente este efecto antigravitatorio, y los equipos que estudian supernovas

descubrieron que si la materia cósmica se compusiera en un 70 % de energía oscura, se obtendría una explicación perfecta para lo observado.

Una media de aciertos del 50 %

Una de las cosas que más me gustan de ser científico es trabajar con gente tan fantástica. La persona con la que he compartido la autoría de la mayoría de mis artículos es un afable argentino llamado Matías Zaldarriaga. Mi exesposa y yo lo llamábamos en secreto «el Gran Zalda», y coincidíamos en que lo único que superaba su talento era su sentido del humor. También era coautor del programa informático que usaba todo el mundo para predecir curvas de espectros de potencias como las de la figura 4.2, y una vez se apostó un billete de avión a Argentina a que todas sus predicciones eran erróneas y no había ningún pico. Durante la preparación de los resultados del proyecto *Boomerang*, aceleramos los cálculos y creamos una base de datos inmensa de modelos que nos permitiera comparar mediciones. Así que cuando los datos de *Boomerang* estuvieron disponibles, volví a colgar un artículo inconcluso en **http://arXiv.org**, y después disfrutamos trabajando sin descanso para acabarlo antes de que fuera público la tarde del domingo. La materia ordinaria (átomos) puede tropezar con material que la materia oscura atraviesa sin más pero que en ella induce un cambio de movimiento por el espacio. Esto significa que la materia ordinaria y la oscura repercuten de maneras distintas en la formación de estructuras cósmicas y en la curva del espectro de potencias del fondo de microondas (véase la figura 4.2). En concreto, si se añaden más átomos a la cantidad de materia, desciende el segundo pico. El equipo de *Boomerang* comunicó un segundo pico verdaderamente escaso, y Matías y yo descubrimos que para eso los átomos tenían que constituir como mínimo el 6 % del total de la materia cósmica. Pero la nucleosíntesis primordial, la historia del reactor de fusión que contamos en el capítulo 3, solo funciona si los átomos conforman el 5 %, así que ¡había algún error! Pasé aquellos días demenciales en Albuquerque, a donde había acudido para dar una conferencia, y fue muy emocionante informar al público sobre aquellas claves que acababa de revelarnos nuestro universo. Matías y yo cumplimos el plazo por los pelos y nuestro artículo apareció en la red incluso antes que el artículo con el análisis del propio equipo de *Boomerang*, el cual se retrasó debido a una computadora quisquillosa que oponía el ridículo argumento de que un pie de figura tenía una longitud excesiva por una palabra de más.

Las comprobaciones cruzadas van bien en ciencia porque revelan errores ocultos. *Boomerang* nos permitió a los cosmólogos efectuar dos

comprobaciones cruzadas sobre la cantidad de materia cósmica:

1. Medimos la fracción de energía oscura de dos modos distintos (con supernovas de tipo Ia y con los picos del fondo cósmico de microondas) y las respuestas concuerdan.
2. Medimos la proporción de materia ordinaria de dos modos distintos (con la nucleosíntesis primordial y con los picos del fondo cósmico de microondas) y las respuestas difieren, así que al menos uno de los dos métodos falla.

Vuelve la protuberancia

Un año después me encuentro en una ostentosa sala para celebrar una conferencia de prensa en Washington D.C., pegado a mi asiento como si Santa Claus estuviera a punto de llegar tres veces seguidas. Primero apareció John Carlstrom informando de resultados procedentes de un telescopio de microondas llamado *DASI* y situado en el polo sur. Tras la palabrería inicial sobre detalles técnicos que yo ya conocía, ¡bum!: ¡la gráfica más extraordinaria del espectro de potencias que había visto en mi vida! Con hasta tres picos claramente visibles. Después llegó el segundo Santa Claus: John Ruhl, del equipo *Boomerang*. Bla, bla, bla y ¡bum!: otro espectro de potencias sorprendente con tres picos en espléndida concordancia con las medidas independientes del *DASI*. Solo que esta vez el segundo pico, otrora exiguo, era mayor después de mejorar el modelado del telescopio. Por último, llegó el tercer Santa Claus: Paul Richards aportó mediciones obtenidas desde un globo experimental llamado *MAXIMA*, que concordaban bien con los datos de los demás. Me quedé sencillamente pasmado. Después de tantos años soñando con aquellos datos esquivos codificados en el cielo del fondo de microondas, ¡allí estaban! Había llegado a pensar que era un orgulloso al creer que los humanos sabíamos qué había hecho nuestro universo tan solo unos cuantos cientos de miles de años después de la Gran Explosión, pero estábamos en lo cierto. Aquella noche me apresuré a volver a ejecutar mis programas para ajustar el modelo con los nuevos datos del fondo de microondas, y ahora que el segundo pico aparecía más alto, mi código predijo alrededor de un 5 % de átomos, en preciosa consonancia con la nucleosíntesis primordial. La comprobación cruzada de los átomos había pasado del fracaso al éxito, y el orden había vuelto al cosmos. Y el orden se mantuvo: hasta ahora *WMAP, Planck* y otros experimentos han medido la curva del espectro

de potencias de una manera más exacta, tal como se ve en la figura 4.2, lo que evidencia que aquellos experimentos tempranos funcionaron bien en realidad.

Precisión en la formación de estructuras

En el año 2003 se podía afirmar que la radiación del fondo cósmico de microondas se había convertido en el mayor éxito de la historia de la cosmología. La sensación general era que podría resolver todos nuestros problemas y permitirnos medir los datos cruciales de nuestro modelo cosmológico. Pero esa percepción era errónea. Imagine que usa una balanza y comprueba que peso 90 kilos. Obviamente no tiene suficiente información para inferir mi altura y mi anchura, puesto que el peso depende de ambos: bien podría ser que fuera alto y delgado, o bajo y rechoncho. A la hora de medir las cantidades determinantes de este universo nos enfrentamos a problemas análogos. Por ejemplo, los tamaños característicos de las manchas del fondo de microondas correspondientes a las ubicaciones horizontales de los picos de espectro de potencias que aparecen en la figura 4.2 dependen tanto de la curvatura del espacio (que amplía o reduce las manchas) como de la densidad de la energía oscura (que altera el ritmo de expansión de nuestro universo y, por tanto, la distancia a la superficie de plasma con sus manchas, lo que también las hace parecer mayores o más pequeñas). Así que, aunque los periodistas proclamaron que experimentos tales como *Boomerang* y *WMAP* habían evidenciado que el espacio es plano, en realidad no es así: este universo podría ser plano con una abundancia aproximada del 70 % de energía oscura, o podría ser curvo con una proporción distinta de energía oscura. Hay otros pares de parámetros cosmológicos que imponen dificultades similares para desentrañar el fondo de microondas, como por ejemplo la amplitud de las acumulaciones de materia en nuestro universo primigenio y el momento en que se formaron las primeras estrellas, los cuales afectan de forma parecida al espectro de potencias de la figura 4.2 (esta vez alterando la altura de los picos). Tal como aprendimos con el álgebra de bachillerato, se precisa más de una ecuación para especificar dos incógnitas. En cosmología queremos esclarecer unos siete números, y el fondo de microondas por sí solo no contiene suficiente información para ello. Así que necesitamos información adicional procedente de otras mediciones cosmológicas. Como, por ejemplo, los mapas tridimensionales de galaxias.

Análisis del desplazamiento hacia el rojo en galaxias

Cuando se confecciona un mapa tridimensional con la ubicación de las galaxias dentro de nuestro universo, primero se examinan fotografías bidimensionales del cielo para localizar galaxias, y después se efectúan mediciones adicionales para calcular a qué distancia se encuentran. El proyecto de cartografía tridimensional más ambicioso hasta la fecha se llama Sloan Digital Sky Survey, y yo tuve la gran suerte de unirme a él mientras realizaba una estancia posdoctoral en Princeton, a pesar de que un pequeño ejército de personas ya había dedicado alrededor de una década a organizar el proyecto, desarrollar la instrumentación del telescopio y ponerlo todo en marcha. Habían hecho el mapa bidimensional de la figura 4.4 después de más de una década tomando imágenes de una tercera parte del cielo con un telescopio de 2,5 metros construido expresamente para este cometido en Nuevo México. Jim Gunn, un profesor de Princeton que me recordaba a un cordial hechicero barbudo, usó sus poderes mágicos para confeccionar la impresionante cámara digital para el telescopio, por entonces la más grande construida jamás con fines astronómicos.

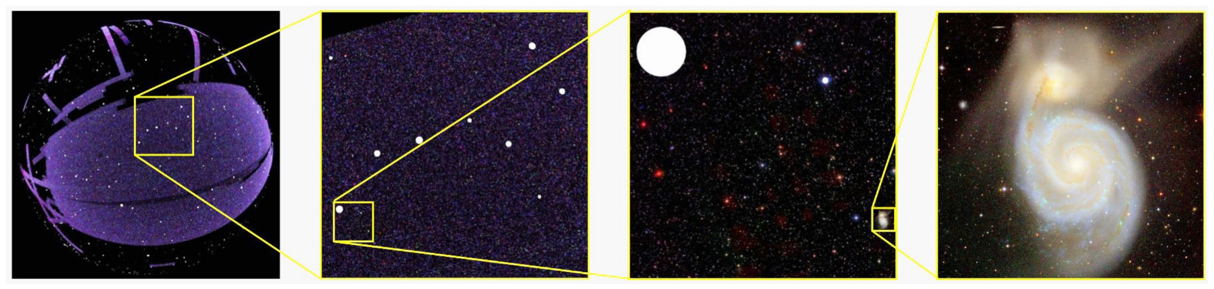


Figura 4.4: El Sloan Digital Sky Survey contiene una cantidad asombrosa de información. El panel de la izquierda, donde la esfera representa todo el firmamento, contiene casi un terapíxel, un millón de megapíxeles. Las imágenes aumentadas sucesivas abarcan la zona situada tras el asterismo de El Carro, en la llamada *galaxia Remolino*, pero cualquier lugar del cielo que se aumente ofrece idéntico grado de detalle. (*Crédito de la imagen: Mike Blanton y David Hogg / SDS Collaboration*).

Si se mira con atención a través de las imágenes de este estudio del cielo, como las de la figura 4.5, se detectan numerosas estrellas, galaxias y otros objetos, en realidad más de 500 millones de ellos. Esta riqueza implica que si pidiéramos a un estudiante de grado que localizara todos los objetos a un ritmo de uno por segundo durante ocho horas al día sin interrupciones para descansar ni en fin de semana ni en vacaciones, tendríamos que esperar cincuenta años a que acabara, y recibiríamos el premio al peor director de tesis de toda la historia. Este trabajo de localización de objetos constituye un problema increíblemente complejo incluso para una computadora: debe ser capaz de distinguir entre galaxias (de aspecto nebuloso y desparramado),

estrellas (que se verían puntuales de no ser por el emborronamiento atmosférico), cometas, satélites y distintos artefactos instrumentales. Peor aún: a veces los objetos se superponen, como cuando se da la mala pata de que una estrella cercana caiga justo delante de una galaxia distante. Después de que un gran grupo de gente bregara contra este problema durante años, al final se resolvió mediante un trabajo de programación heroico de Robert Lupton, un inglés jovial que usaba el nombre «Robert Lupton el Bueno» en su dirección electrónica y siempre andaba descalzo (figura 4.5).

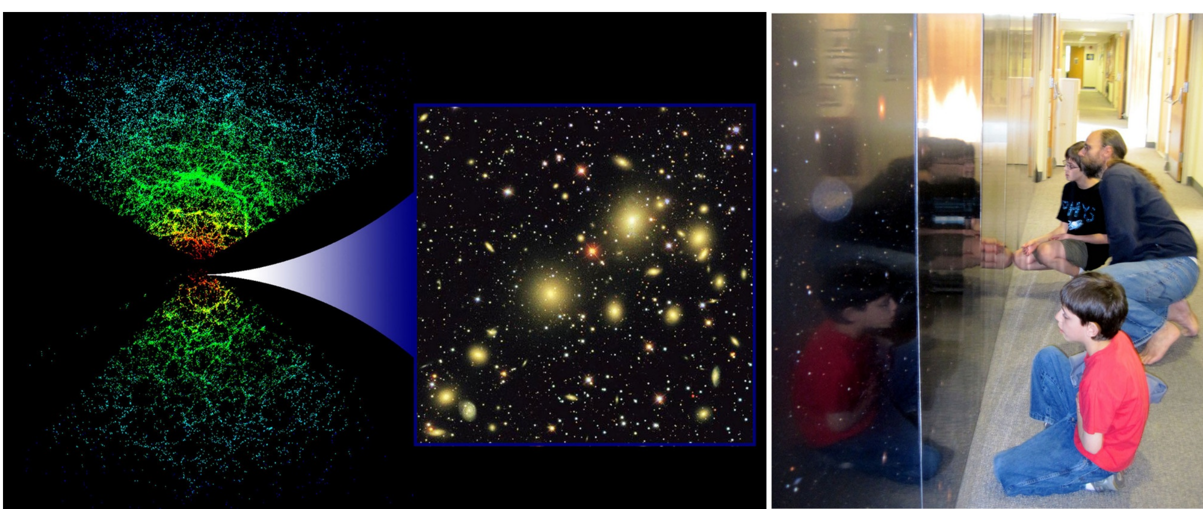


Figura 4.5: Un pequeño fragmento del mapa del Sloan Digital Sky Survey se ha usado para decorar una pared entera del Departamento de Astronomía de la Universidad de Princeton, donde aparece Robert Lupton observándolo junto a mis hijos. Cuando el programa de Robert ha identificado todos los objetos que constan en el mapa, se miden las distancias a las galaxias más interesantes y se crea un mapa tridimensional (izquierda) con nosotros en su centro y donde cada punto representa una galaxia. La «Gran Muralla Sloan» se aprecia como a un tercio de la imagen desde la parte superior.

El siguiente paso consiste en calcular a qué distancia se halla cada galaxia. En el capítulo 3 vimos que la ley de Edwin Hubble $v = Hd$ significa que este universo se está expandiendo, así que cuanto mayor es la distancia d de una galaxia lejana, mayor es la velocidad v a la que se aleja de nosotros. Ahora que la ley de Hubble está firmemente asentada, podemos usarla al revés, como método para medir distancias: si medimos a qué velocidad se aleja la galaxia usando el desplazamiento hacia el rojo de sus líneas espectrales, conoceremos la distancia. En el fondo resulta fácil medir desplazamientos hacia el rojo y velocidades en astronomía, mientras que medir distancias es difícil, así que la ley de Hubble ahorra trabajo: una vez medido el parámetro de Hubble H usando algunas galaxias cercanas, basta con medir las velocidades v de galaxias lejanas a partir del desplazamiento hacia el rojo en sus espectros, y después dividir entre H para obtener una buena estimación de su distancia.

A partir del catálogo de objetos generado por el programa de Robert Lupton, se seleccionaron los más interesantes (alrededor de un millón) para medir sus espectros. En la época de Hubble se tardaban semanas en reunir los 24 espectros de galaxias que este utilizó para descubrir la expansión cósmica. En cambio, el Sloan Digital Sky Survey generaba espectros en masa a un ritmo de 640 por hora, todos medidos al mismo tiempo. El truco consistía en colocar 640 fibras ópticas en los lugares del plano focal del telescopio donde el catálogo de Robert decía que estarían las imágenes de las galaxias, y esas fibras dirigían la luz de las galaxias hacia un espectrógrafo que la descomponía en 640 arcoíris separados y convertidos en imágenes mediante una cámara digital. Otro paquete de programas, esta vez dirigido por David Schlegel y otros colegas, analizaba aquellos arcoíris para calcular la distancia a cada galaxia (a partir del desplazamiento hacia el rojo de sus líneas espectrales) y otras propiedades de estos objetos.

En la parte izquierda de la figura 4.5 se reproduce una imagen tridimensional de nuestro universo donde cada punto representa una galaxia; cuando siento que necesito alejarme de todo durante unos instantes, me gusta deambular entre las galaxias con un simulador de vuelo cosmológico tridimensional que tengo. Eso me transmite una sensación hermosa: formamos parte de algo grandioso. No solo vivimos en un planeta que forma parte de un sistema planetario, y el Sistema Solar forma parte de una galaxia, sino que nuestra Galaxia es parte de un entramado cósmico de agrupaciones, cúmulos, supercúmulos de galaxias y estructuras filamentosas colosales. Mientras analizaba este mapa e iba descubriendo lo que ahora se conoce como la «Gran Muralla Sloan» (figura 4.5 izquierda), su tamaño me sobrecogió tanto que en un primer momento pensé que había un error en el código. Sin embargo, algunos de mis colaboradores lo descubrieron de forma independiente y definitivamente es real: mide mil cuatrocientos millones de años-luz de largo; es la mayor estructura conocida en este universo. Tales patrones de estructura a gran escala son un tesoro cosmológico oculto que codifica la clase de información valiosa ausente en el fondo cósmico de microondas.

De la cosmología de irrisión a la cosmología de precisión

Estos patrones en la distribución de las galaxias son en realidad los mismos que se nos manifestaron en los mapas del fondo cósmico de microondas, solo que miles de millones de años más tarde, amplificados por la gravitación. En una región del espacio donde el gas fue una vez un 0,001 % más denso que el

entorno, lo que creó una mancha en el mapa *WMAP* (véase la figura 3.4), podría haber hoy un cúmulo formado por un centenar de galaxias. En este aspecto, podemos imaginar las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas como el ADN cósmico, las semillas (hay quien las llama *cosmosomas*) para que nuestro universo se convirtiera en lo que es hoy. Al comparar las ligeras anisotropías del pasado que se aprecian en el fondo cósmico de microondas con la intensa corriente de heterogeneidades que se observa en un mapa tridimensional de galaxias, podemos medir la naturaleza detallada de la materia cuya atracción amplificó las heterogeneidades desde entonces hasta ahora.

Del mismo modo que las anisotropías del fondo de microondas se caracterizan por un espectro de potencias curvo (véase la figura 4.2), lo mismo le ocurre a las heterogeneidades en la distribución de galaxias. Sin embargo, la medición precisa de esta curva resulta realmente complicada: tardé seis años (¡seis!) en concluir la medición del espectro de potencias de las galaxias que figuran en el Sloan Digital Sky Survey de la figura 4.6, a pesar de la gran cantidad de ayuda que recibí de compañeros, y acabó siendo el proyecto más agotador en el que me he embarcado jamás. Una y otra vez me decía: «¡Menos mal que casi he acabado por fin, porque ya no aguanto más!», solo para descubrir otro problema grave en el análisis.

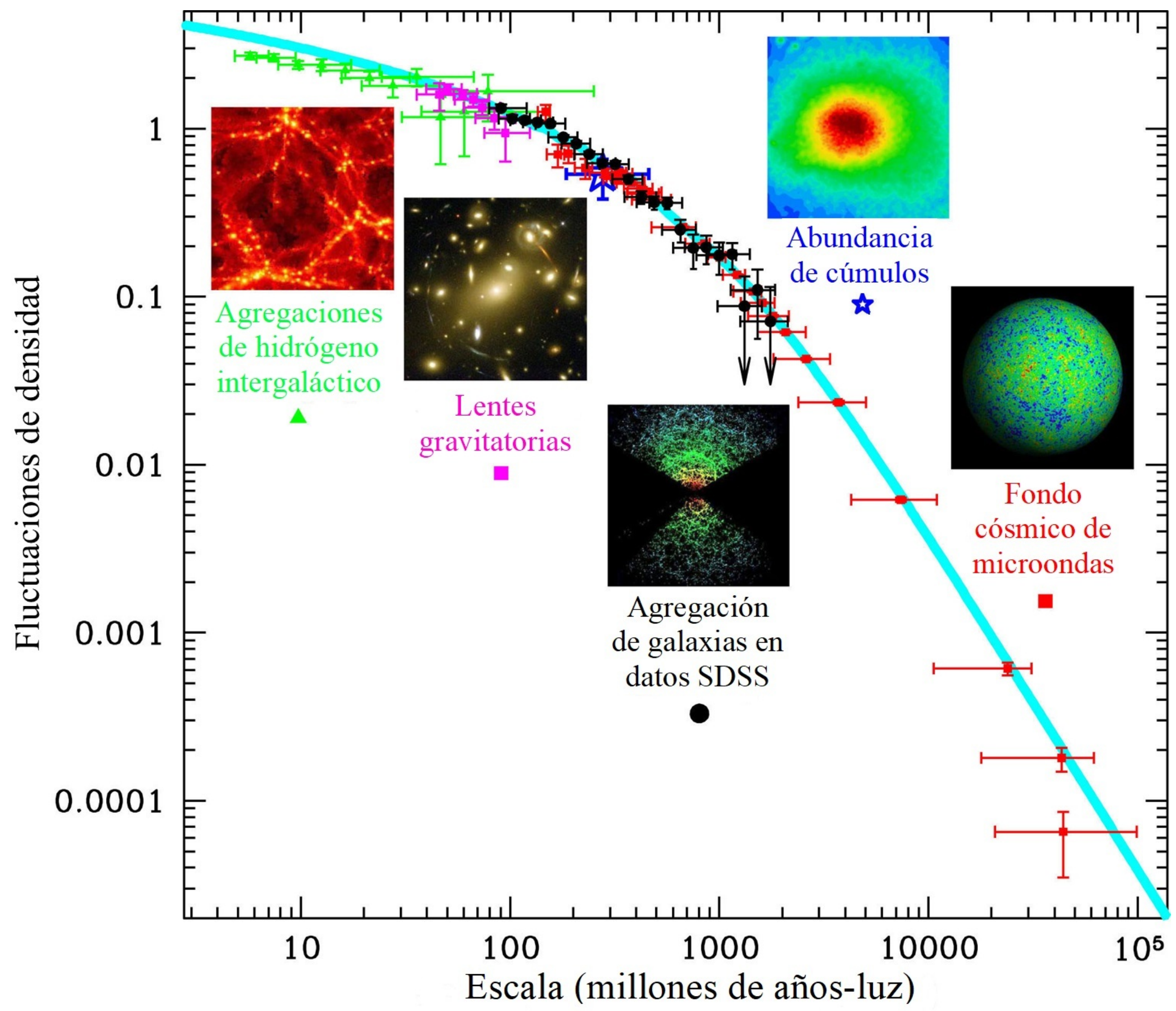


Figura 4.6: La estructura a gran escala de la materia en este universo se describe mediante la curva del espectro de potencias ilustrada aquí. El hecho de que la curva valga más o menos el 10 % a mil millones de años-luz significa que, si se mide la cantidad de masa dentro de una esfera de ese radio, entonces el resultado tendrá una variación del 10 % dependiendo del lugar del espacio donde se coloque la esfera. A diferencia de cuando empecé en este campo, ahora existen mediciones de alta precisión que concuerdan con la predicción teórica. Me parece muy significativo que las cinco mediciones existentes de esta curva coincidan entre sí a pesar de que se efectuaron con datos, personas y métodos completamente distintos.

¿Por qué fue tan difícil? Bueno, habría resultado sencillo si conociéramos la posición exacta de cada galaxia dentro de nuestro universo y si dispusiera de una computadora potentísima con la que efectuar el análisis. En la práctica no vemos muchas de las galaxias debido a complicaciones diversas, y algunas de las que vemos se hallan a una distancia y tienen una luminosidad distintas a las que creemos. Si se ignoran estas complicaciones se obtiene un espectro de potencias incorrecto, que se traduce en conclusiones erróneas acerca de este universo.

Los primeros mapas tridimensionales de galaxias eran tan reducidos que no valía la pena dedicar un montón de tiempo a analizarlos. Mi colega

Michael Vogeley me proporcionó una gráfica estupenda que reunía todas las mediciones obtenidas más o menos hasta 1996, y cuando le pregunté por qué no había introducido en ella barras de error para indicar la incertidumbre de las mediciones, me dijo: «Porque no me las creo». Su escepticismo era bien fundado: algunos equipos obtenían resultados que diferían de los otros en un factor 10, así que no todos podían estar bien.

Poco a poco, grupos de todas partes del mundo se lanzaron a confeccionar mapas tridimensionales mayores y a compartirlos en la red. Pensé que si había tanta gente dedicando enormes esfuerzos a realizar aquellos mapas, merecían un análisis verdaderamente cuidadoso. Así que trabajé en equipo con mi amigo Andrew Hamilton para realizar ese esfuerzo adicional y medir el espectro de potencias de las galaxias con los mismos métodos de teoría de la información que habíamos desarrollado para el análisis del fondo cósmico de microondas.

Andrew es un británico alegre, incorregible, de pícara y radiante sonrisa y uno de mis colaboradores preferidos. Una vez llegué tarde a un restaurante donde había quedado con Andrew y con mis amigos Wayne Hu y David Hogg, quien recientemente se había afeitado la cabeza. Al preguntarle a la camarera si había visto un trío parecido a Robert Redford, Bruce Lee y Kojak, reflexionó un instante, sonrió y me dijo: «Sí, veo a Robert Redford…». Primero avanzamos de manera progresiva analizando mapas tridimensionales cada vez mayores y de oscuros nombres, como *IRAS, PSCz, UZC* y *2dF*, con unas 5000, 15 000, 20 000 y 100 000 galaxias, respectivamente. Como él residía en Colorado, mantuvimos interminables conversaciones sobre los intríngulis matemáticos para medir el espectro de potencias a través del correo electrónico, por teléfono y durante las excursiones a pie que realizamos por los Alpes y las Montañas Rocosas.

El mapa del Sloan Digital Sky Survey era el más grande y limpio de todos, basado en imágenes íntegramente digitales y en un meticuloso control de calidad, así que pensé que también merecía el análisis más esmerado. Como la calidad de los resultados no podía resultar mejor que la calidad del eslabón más débil de la cadena, me pasé años trabajando en muchas de las cuestiones engorrosas consideradas como las más tediosas. La profesora Jill Knapp, una de las fuerzas propulsoras del proyecto, y la esposa de Jim Gunn, organizaban encuentros semanales en Princeton en los que nos mimaban a todos con comidas irresistibles mientras intentábamos identificar todos los secretos ocultos en el análisis y calcular qué hacer con ellos. Por ejemplo, la cantidad de galaxias que debíamos cartografiar en una dirección concreta

dependía de la calidad de la meteorología en el instante en que se tomó la imagen, de la cantidad de polvo galáctico interpuesto y de la fracción de galaxias visibles que pudiera cubrirse mediante las fibras ópticas. Lo cierto es que fue una tarea muy aburrida, así que le ahorraré los detalles, pero a pesar de ello conseguí gran cantidad de ayuda por parte de mucha gente, sobre todo del profesor Michael Strauss y de quien a la sazón era su estudiante de posgrado, Mike Blanton. En paralelo seguí el ciclo aparentemente interminable de computación de terabytes de tablas de números llamadas *matrices* ejecutado por el ordenador durante varias semanas en busca de gráficas de resultados erróneos para depurar mi código y volver a intentarlo de nuevo.

Después de seis años así, al fin presenté dos artículos con resultados en 2003, ambos con más de 60 coautores. En toda mi vida nunca me había sentido tan aliviado al finalizar algo, salvo tal vez este libro. El primer artículo trataba sobre la medición del espectro de potencias de galaxias que aparece en la figura 4.6, y el segundo hablaba sobre una medición de parámetros cosmológicos a partir de la combinación de esto con el espectro de potencias del fondo de microondas. He relacionado algunos de los aspectos más destacados en la tabla 4.1; he actualizado los datos con las medidas más recientes tomadas por otros, pero los valores no han experimentado cambios significativos a pesar de que se han reducido las incertidumbres. Aún tenía frescos en la memoria los vehementes debates que manteníamos en mi época de estudiante de posgrado sobre si nuestro universo tendría diez mil millones o veinte mil millones de años de edad, ¡mientras que en aquel momento discutíamos si tenía trece mil setecientos o trece mil ochocientos millones de años! Al fin había llegado la cosmología de precisión, y me sentí emocionado y honrado de haber contribuido un tanto a todo ello.

Nombre del parámetro	**Símbolo del pará metro**	**Valor medido**	**Incerti dumbre**
Proporción de átomos	Ω_b	0,049	2 %
Proporción de materia oscura	Ω_d	0,27	4 %
Proporción de energía oscura	Ω_Λ	0,68	1 %
Proporción de neutrinos	Ω_ν	0,003	100 %
Cantidad total	Ω_{tot}	1,001	0,7 %
Edad de nuestro universo en gigaaños	t_0	13,80	0,2 %
Amplitud de fluctuaciones primor diales	Q	0,0000195	3 %
Índice de la ley de potencias	n	0,96	0,5 %

Tabla 4.1: La combinación de mapas del fondo cósmico de microondas con mapas tridimensionales de galaxias permite medir cantidades cósmicas cruciales con una precisión a niveles porcentuales.

A un nivel personal, este desenlace me trajo bastante suerte: me consideraron para seguir en el MIT en el otoño de 2004 y me dijeron que para lograrlo necesitaría «un *home run* o al menos un par de dobles». Igual que los músicos cuentan con las listas de los 10 más vendidos, los científicos tenemos las listas de los más citados: cada vez que alguien cita un artículo tuyo, acumulas un punto más a tu favor. Los mecanismos para citar a otros llegan a ser aleatorios y hasta absurdos, tendentes a crear corrientes, puesto que los autores desganados suelen copiar las citas de otros sin leer en realidad los artículos citados y, sin embargo, las comisiones de promoción tienen tan en cuenta estos índices de citas como los entrenadores de fútbol la frecuencia de goles. Y ahora, justo cuando más necesitaba un poco de suerte, esos dos textos se convirtieron de pronto en mis artículos más citados de todos los tiempos, uno de ellos hasta fue el artículo de física más citado en 2004. Aquel privilegio no duró mucho, pero sí lo bastante como para influir en la decisión de mi promoción. La chiripa continuó hasta que la revista *Science* decidió que el «Descubrimiento del año 2003» más importante fue que la cosmología había cobrado al fin credibilidad haciendo mención a los resultados del *WMAP* y a nuestro análisis del Sloan Digital Sky Survey.

Sin embargo, lo cierto es que aquella información no fue un descubrimiento en absoluto, sino un mero reflejo del lento pero progresivo avance que había logrado la comunidad cosmológica mundial en los últimos años. Nuestro trabajo no fue en modo alguno revolucionario y no descubrió nada asombroso, tan solo se limitó a contribuir a que la cosmología fuera más creíble, a convertirla en una ciencia más madura. Para mí lo más sorprendente fue que no hubiera ninguna sorpresa.

El famoso físico soviético Lev Landau dijo una vez que «los cosmólogos suelen equivocarse, pero nunca dudan» y hemos visto muchos ejemplos de esto, desde la afirmación de Aristarco de que el Sol se encontraba 18 veces más cerca, hasta la declaración de Hubble de que el universo se expandía siete veces más deprisa. Esta época de «Salvaje Oeste» ya pasó: como hemos visto, la nucleosíntesis primordial y el estudio de la formación de estructuras cósmicas arrojaron la misma medida de la densidad de átomos, y tanto las supernovas de tipo Ia como la estructura cósmica arrojaron la misma medida de la densidad de energía oscura. De todas las comprobaciones cruzadas existentes mi preferida es la de la figura 4.6: en ella aparece la gráfica de cinco mediciones distintas de la curva del espectro de potencias, y aunque los

datos, la gente y los métodos fueron completamente distintos en cada una de ellas, se ve que todas concuerdan.

El mapa definitivo de este universo

Aún queda mucho por explorar

Así que aquí estoy sentado en mi cama, tecleando estas palabras y meditando sobre cuánto ha cambiado la cosmología. En los tiempos en que era un científico posdoctoral solíamos charlar sobre lo estupendo que sería conseguir todos aquellos datos de precisión y medir al fin aquellos parámetros cosmológicos con exactitud. Ahora podemos decir que «ya estamos de vuelta de todo eso»: las respuestas están en la tabla 4.1. Y ¿ahora qué? ¿Se acabó la cosmología? ¿Debemos encontrar los cosmólogos algún otro cometido?

He aquí mi respuesta: «¡No!». Para apreciar lo entretenida que sigue siendo la investigación cosmológica, seamos sinceros sobre lo poco que hemos conseguido los cosmólogos: sobre todo nos hemos limitado a poner parámetros a nuestra ignorancia, porque tras cada parámetro de la tabla 4.1 se oculta un misterio inexplicado. Por ejemplo:

> Hemos medido la densidad de la materia oscura, pero ¿qué es?
> Hemos medido la densidad de la energía oscura, pero ¿qué es?
> Hemos medido la densidad de átomos (hay alrededor de un átomo por cada 2000 millones de fotones), pero ¿qué proceso creó esa cantidad?
> Hemos medido que las fluctuaciones primordiales estaban a un nivel del 0,002 %, pero ¿qué procesos las crearon?

A medida que los datos sigan mejorando, podremos usarlos para medir los números de la tabla 4.1 con una precisión aún mayor, con más decimales. Pero a mí me hace mucha más ilusión usar los datos perfeccionados para medir otras propiedades de la materia oscura y la energía oscura, aparte de su densidad. ¿Tiene presión la materia oscura? ¿Tiene velocidad? ¿Y temperatura? Esto arrojaría luz sobre su naturaleza. ¿De verdad es exactamente constante la densidad de la energía oscura, tal como parece de momento? Si lográramos registrar una variación siquiera mínima a lo largo del tiempo o de un lugar a otro, se convertiría en un dato crucial sobre su naturaleza y sobre cómo repercutirá la energía oscura en el futuro de este universo. ¿Tienen algún patrón o propiedad las fluctuaciones primordiales,

aparte de su amplitud del 0,002 %? Todo ello aportaría claves sobre los orígenes de nuestro universo.

He meditado mucho sobre qué habría que hacer para abordar estas cuestiones y, curiosamente, la respuesta es la misma para todas ellas: ¡Cartografiar nuestro universo! En concreto, debemos obtener un mapa tridimensional de este universo lo más completo posible. El mayor volumen que posiblemente logremos cartografiar es la región del espacio en la que la luz ha tenido tiempo de alcanzarnos desde la distancia. Este volumen se corresponde en esencia con el interior de la esfera de plasma (figura 4.7, izquierda) que ya hemos investigado y, tal como se ve en el panel central de esta figura, más del 99,9 % del volumen permanece inexplorado. Asimismo, se aprecia que el mapa tridimensional de galaxias más ambicioso que hemos realizado, el del Sloan Digital Sky Survey, tan solo cubre nuestros alrededores cósmicos: ¡este universo es sencillamente descomunal! Para introducir en esa imagen las galaxias más distantes conocidas, habría que situarlas un poco más allá de la mitad del camino hasta el borde y serían pocas y demasiado alejadas entre sí como para conformar un mapa tridimensional útil.

Si halláramos algún modo de cartografiar esas regiones ignotas de nuestro universo, sería fantástico para la cosmología. No solo multiplicaría por 1000 la información cosmológica disponible, sino que, como mucha distancia equivale a un pasado lejano, también revelaría con gran detalle qué ocurrió durante la primera mitad de nuestra historia cósmica. Pero ¿cómo? Todas las técnicas mencionadas aquí seguirán perfeccionándose de diversas formas interesantes, pero por desgracia no parece que vayan a lograr cartografiar en algún momento cercano una gran fracción de ese 99,9 % del volumen que aún no lo está. Los experimentos con el fondo cósmico de microondas cartografían sobre todo el contorno de este volumen, puesto que el interior es transparente en su mayoría a las microondas. A distancias tan vastas, la mayoría de las galaxias son muy tenues y difíciles de ver incluso con los mejores telescopios. Aún peor: la mayoría del volumen dista tanto de nosotros que casi no contiene ninguna galaxia; observamos tan lejos en el tiempo ¡que la mayoría de las galaxias aún no se habían formado!



Figura 4.7: La fracción del universo observable (izquierda) que se ha cartografiado (centro) es minúscula, abarca menos del 0,1 % del volumen. Igual que Australia en 1838 (derecha), hemos cartografiado una estrecha franja alrededor del perímetro, mientras que el interior permanece inexplorado. En la imagen central, la circunferencia es plasma (la radiación que observamos del fondo-cósmico de microondas procede únicamente del delgado borde interior gris), y la diminuta estructura próxima al centro se corresponde con el mayor mapa tridimensional de galaxias que existe, el del Sloan Digital Sky Survey.

Mapa del hidrógeno

Por suerte, disponemos de una técnica para confeccionar mapas que quizá funcione mejor. Tal como comentamos con anterioridad, lo que llamamos espacio vacío no está vacío en realidad: está lleno de gas hidrógeno. Es más, en física se sabe hace mucho tiempo que el gas hidrógeno emite ondas de radio con una longitud de onda de 21 centímetros, lo que se puede detectar mediante radiotelescopios. (Cuando mi compañero de clase Ted Bunn enseñaba esto en Berkeley, un alumno le formuló una pregunta que al instante se convirtió en un clásico: «¿Cuál es la longitud de onda de la línea de 21 centímetros?»). Esto significa que, en principio, el hidrógeno se puede «ver» con un radiotelescopio a través de todo este universo, incluso mucho antes de que formara estrellas y galaxias, cuando aún era invisible a los telescopios convencionales. Y lo que es incluso mejor, podemos realizar un mapa tridimensional de gas hidrógeno usando el concepto del desplazamiento hacia el rojo que comentamos en el capítulo 2: como estas ondas de radio están estiradas debido a la expansión de nuestro universo, la longitud de onda que presentan cuando llegan a la Tierra indica desde qué distancia (y, por tanto, desde qué instante temporal) provienen. Por ejemplo, las ondas que llegan con una longitud de 210 centímetros han aumentado 10 veces su longitud inicial, así que fueron emitidas cuando este universo era 10 veces más pequeño que ahora. Esta técnica se conoce como tomografía en 21 centímetros, y como tiene el potencial de convertirse en la próxima grandeza de la cosmología, está acaparando la atención en los últimos tiempos. Muchos equipos de todo

el mundo están reaccionando para erigirse en los primeros en detectar de forma convincente esta esquiva señal procedente del hidrógeno desde un lugar intermedio de nuestro universo, pero tan lejano que nadie lo ha logrado aún.

¿Qué es un telescopio en realidad?

¿Por qué es tan difícil? Pues porque la señal de radio es muy tenue. ¿Qué se necesita para captar una señal muy débil? Un telescopio grande de verdad. Un tamaño de un kilómetro cuadrado sería estupendo. ¿Qué se necesita para construir un telescopio grande de verdad? Pues un presupuesto grande de verdad. ¿Pero de qué cantidad exacta hablamos? ¡Aquí es donde el asunto se pone interesante! Para un radiotelescopio normal como el de la figura 4.8 (al fondo) el coste pasa del doble si duplicamos su tamaño, y alcanza una cuantía descabellada a partir de unas dimensiones determinadas. Si pidieras a una amiga ingeniera mecánica que construyera un disco de un kilómetro cuadrado con motores que permitieran girarlo hacia cualquier dirección del cielo, dejaría de ser tu amiga.

Esta es la razón por la que todos los experimentos destinados a practicar tomografía en 21 centímetros emplean una clase más moderna de radiotelescopio llamado *interferómetro*. Como las ondas de luz y de radio son fenómenos electromagnéticos, crean un voltaje entre distintos puntos del espacio a medida que lo atraviesan. Se trata de voltajes muy débiles, por supuesto, muy inferiores a los 1,5 voltios que median entre ambos extremos de la pila de una linterna, pero aun así lo bastante intensos como para detectarse con buenas antenas y amplificadores. La idea básica de la interferometría consiste en medir gran cantidad de voltajes de este tipo usando una red de radioantenas y, después, en reconstruir por ordenador el aspecto del cielo. Si todas las antenas se encuentran en un plano horizontal, como en la figura 4.8 (primer plano), entonces una onda que llegue justo desde la vertical las alcanzará a todas de manera simultánea. Otras ondas llegan a unas antenas antes que a otras, y el ordenador aprovecha esta circunstancia para calcular de qué direcciones proceden. El cerebro humano utiliza el mismo método para calcular de dónde provienen las ondas sonoras: si el oído izquierdo detecta el sonido antes que el derecho, entonces está claro que procede de la izquierda, y si se mide con exactitud la diferencia de tiempo, el cerebro puede calcular incluso si proviene justo desde nuestra izquierda o si nos llega con cierto ángulo. Como solo tenemos dos oídos no podemos especificar el ángulo con demasiada precisión, pero lo haríamos mucho mejor

(aunque tal vez no desde un punto de vista estético…) si imitáramos un gran radiointerferómetro y tuviéramos cientos de orejas distribuidas por todo el cuerpo. La idea del interferómetro ha cosechado éxitos enormes desde que Martin Ryle la iniciara en 1946, lo que le valió el Premio Nobel de 1974.



Figura 4.8: Radioastronomía con un presupuesto generoso (fondo) y con un presupuesto modesto (primer plano). Mi alumno de posgrado Andy Lutomirski juguetea con la unidad electrónica que instalamos en una tienda para protegerla de la lluvia durante una expedición que hicimos a Green Bank, en Virginia Occidental.

No obstante, el paso computacional más lento, que se corresponde con la medición de esas diferencias temporales, se tiene que hacer una vez para cada par de antenas (u orejas) y, si aumenta la cantidad de antenas, el número de pares asciende casi al cuadrado del número de antenas. Esto significa que si multiplicamos por 1000 la cantidad de antenas, el trabajo de la computadora se vuelve un millón de veces mayor. ¡Mecachis! ¡Queríamos que lo astronómico fuera el telescopio, no el presupuesto! Por este motivo, los interferómetros se han limitado hasta ahora a decenas o centenares de antenas, pero no el millón aproximado que se necesitaría en realidad para la tomografía en 21 centímetros.

Cuando me trasladé al MIT, tuvieron la generosidad de dejarme participar en un experimento australiano-estadounidense de tomografía en 21 centímetros dirigido por mi colega Jackie Hewitt. Durante las reuniones del proyecto a veces me daba por fantasear sobre si habría alguna manera de construir telescopios inmensos con menos dinero. Y entonces, una tarde durante uno de nuestros encuentros en Harvard se me ocurrió de repente: ¡Hay una manera más económica!

El omniscopio

Concibo los telescopios como máquinas para clasificar ondas. Si nos miramos la mano y medimos la intensidad de la luz que la atraviesa, no descubriremos el aspecto de nuestro rostro porque las ondas de luz procedentes de cualquier lugar de la cara se mezclan en todos los puntos de la piel. Pero si pudiéramos clasificar de algún modo todas esas ondas de luz dependiendo de la dirección en la que viajan, porque las ondas que siguen direcciones diferentes inciden en distintas partes de la mano, entonces reconstruiríamos una imagen de la cara. Justo eso es lo que hace la lente de una cámara, ya sea en un telescopio o en el ojo, y lo que hace el espejo curvo del radiotelescopio de la figura 4.8. En matemáticas existe un nombre estrafalario e intimidatorio para la clasificación de ondas: *transformada de Fourier*. Así que un telescopio es un transformador de Fourier. Mientras que los telescopios tradicionales realizan la transformada de Fourier por medios analógicos, a través de lentes o espejos curvos, el interferómetro lo hace de manera digital, usando cierta clase de computadora. Las ondas se clasifican no solo por la dirección en la que viajan, sino también por su longitud de onda, que en la luz visible equivale al color. La idea que se me ocurrió aquella tarde en Harvard consistió en diseñar un radiointerferómetro inmenso donde las antenas no estuvieran repartidas de manera más o menos arbitraria, como en el proyecto que teníamos entre manos, sino siguiendo un patrón simple y regular. En el caso de un telescopio formado por un millón de antenas, esto permitiría computar la transformada de Fourier 25 000 veces más rápido recurriendo a algunos ingeniosos trucos numéricos que aprovecharan el patrón regular, lo que tornaría el telescopio 25 000 veces más económico.

Cuando conseguí convencer a mi amigo Matías Zaldarriaga de que la idea funcionaría, la estudiamos en detalle y publicamos dos artículos ilustrando que el truco básico funcionaba con un rango amplio de distribuciones de antenas. Llamamos *omniscopio* al telescopio que proponíamos porque era tanto omnidireccional (tomaba imágenes simultáneas de todo el cielo) como

omnicromático (tomaba imágenes simultáneas de gran variedad de longitudes de onda/«colores»).

Dicen que Albert Einstein afirmó una vez: «En teoría, la teoría y la práctica son lo mismo. En la práctica, no lo son». Así que decidimos construir un pequeño prototipo para ver si *de verdad* funcionaba. Descubrí que la idea básica del omniscopio ya la había probado veinte años antes un grupo japonés, con una finalidad diferente, pero se topó con las limitaciones electrónicas de la época para 64 antenas. Gracias a la revolución ulterior de los teléfonos móviles, los componentes fundamentales necesarios para nuestro prototipo habían experimentado una bajada espectacular de precio, lo que nos permitió ejecutar todo el plan con un presupuesto mínimo. También fue una gran suerte contar con la ayuda de un grupo estupendo de alumnos del MIT, algunos de los cuales venían del Departamento de Ingeniería Eléctrica y conocían la clase de magia que necesitábamos para diseñar el cuadro de mandos electrónico y para el procesamiento de señales digitales. Una de ellos, Nevada Sánchez, me enseñó la teoría electrónica del humo mágico, la cual comprobé con posterioridad en el laboratorio: los componentes electrónicos funcionan porque contienen humo mágico. De modo que, si por accidente, les haces algo que libere al exterior el humo mágico, dejan de funcionar…

Tras pasar toda mi vida académica dedicado únicamente a la teoría y al análisis de datos, entregarme de pronto a preparar un experimento práctico fue algo completamente distinto que me encantó. Me trajo gratos recuerdos de cuando trajinaba en el sótano en mi adolescencia, solo que ahora estábamos desarrollando algo mucho más emocionante y nos divertíamos mucho trabajando en equipo. De momento, el omniscopio va bien, pero es demasiado pronto para decir si nosotros o alguna otra persona conseguirá a la larga hacer que la tomografía en 21 centímetros funcione con todo su potencial.

No obstante, el omniscopio ya me ha enseñado algo, algo sobre mí mismo. La parte que más me gustó de todas fueron las expediciones del equipo: cuando cargábamos todo el instrumental en una furgoneta y viajábamos a lugares remotos alejados de emisoras de radio, teléfonos móviles y otras fuentes humanas de ondas de radio. Durante aquellas jornadas mágicas, mi vida, habitualmente dividida entre correos electrónicos, la docencia, reuniones y obligaciones familiares, quedaba reemplazada por un estado de dicha al estilo zen completamente focalizado: nada de llamadas, ni de Internet, ni interrupciones, y todos y cada uno de los miembros del equipo centrados en el objetivo común de hacer funcionar el experimento. A veces me pregunto si no llevamos una vida demasiado ocupada en la actualidad, y si

no debería marcharme así más a menudo por otras razones. Como acabar este libro…

¿De dónde salió la Gran Explosión?

En este capítulo hemos visto que un aluvión de datos de precisión ha transformado la cosmología del campo especulativo, filosófico que era en la ciencia de precisión que es hoy en día y que nos ha permitido medir la edad de este universo hasta con una incertidumbre del 1 %. Tal como suele ocurrir en ciencia, la resolución de viejos interrogantes ha destapado otros nuevos, y auguro que tenemos ante nosotros una década apasionante en la que los cosmólogos del mundo entero desarrollarán teorías y experimentos para arrojar luz sobre la naturaleza de la materia oscura, la energía oscura y otros misterios. En el capítulo 13 retomaremos esta cuestión y sus implicaciones para el destino último de este universo.

Una de las lecciones más impactantes para mí de la cosmología de precisión es que nuestro universo se rige por leyes matemáticas simples desde sus más violentos orígenes. Por ejemplo, las ecuaciones que conforman la teoría de la relatividad general de Einstein parecen gobernar con exactitud la fuerza gravitatoria a través de distancias que van desde un milímetro hasta 100 cuatrillones (10^{26}) de metros, y las ecuaciones de la física atómica y nuclear parecen haber gobernado con exactitud este universo desde el primer segundo posterior a la Gran Explosión hasta la actualidad, catorce mil millones de años después. Y no de manera grosera, como las ecuaciones de la economía, sino con una precisión asombrosa, tal como ilustra la figura 4.2. De este modo, la cosmología de precisión subraya la enigmática utilidad de las matemáticas para comprender el mundo. Regresaremos a este misterio en el capítulo 10 y exploraremos una explicación absolutamente novedosa de todo ello.

Otra lección impresionante de la cosmología de precisión es que está incompleta. Ya vimos que todo lo que observamos en nuestro universo en la actualidad evolucionó a partir de una Gran Explosión caliente en la que un gas casi uniforme y tan caliente como el núcleo del Sol se expandió tan deprisa que duplicó su tamaño en menos de un segundo. Pero ¿quién ordenó eso? Me gusta pensar en ello como el «problema de la explosión»: ¿qué puso la explosión en la Gran Explosión? ¿De dónde salió este gas caliente en expansión? ¿Por qué era tan uniforme? ¿Y por qué quedó marcado con ese

nivel del 0,002 % de fluctuaciones primordiales que con el tiempo aumentó hasta formar las galaxias y la estructura a gran escala que observamos a nuestro alrededor dentro de este universo en la actualidad? En resumen, ¿cómo empezó todo eso? Como veremos, al extrapolar aún más hacia el pasado las ecuaciones de Fridman sobre este universo en expansión, encontramos indicios de que necesitamos una idea absolutamente revolucionaria para discernir nuestros orígenes últimos. A eso dedicaremos el próximo capítulo.

SUMARIO

- El reciente aluvión de datos sobre el fondo cósmico de microondas, distribución espacial de galaxias, etc., ha transformado la cosmología en una ciencia de precisión; por ejemplo, hemos pasado de discutir si la edad de este universo asciende a diez mil o veinte mil millones de años, a dudar de si suma trece mil setecientos o trece mil ochocientos millones de años.
- Cabe afirmar que la teoría de la gravitación de Einstein batió el récord como la teoría matemática más elegante, que explica la gravitación como una manifestación de la geometría. Gracias a ella sabemos que cuanta más materia contiene el espacio, más curvado se vuelve. Esta curvatura del espacio provoca que las cosas no se muevan en línea recta, sino siguiendo trayectorias que se deforman hacia los objetos masivos.
- Al medir la geometría de triángulos del tamaño de nuestro universo, la teoría de Einstein nos ha permitido deducir la cantidad total de masa que contiene este universo. Curiosamente, los átomos, que se consideraban los elementos esenciales de todo, resultaron constituir tan solo el 4 % de toda esa masa, lo que nos deja con un 96 % de masa sin explicación.
- La masa que falta es fantasmagórica, puesto que es tanto invisible como capaz de atravesarnos sin que la detectemos. Sus efectos gravitatorios sugieren que consiste en dos sustancias diferenciadas de naturaleza opuesta apodadas materia oscura y energía oscura: la materia oscura se agrega, y la energía oscura, no. La materia oscura se diluye a medida que se expande, la energía oscura, no. La materia oscura atrae, la energía oscura repele. La materia oscura ayuda a que se formen las galaxias, la energía oscura lo dificulta.

- La cosmología de precisión ha revelado que este universo se rige por leyes matemáticas simples a lo largo de todo el intervalo temporal que se remonta a sus violentos orígenes.
- A pesar de ser elegante, el modelo clásico de la Gran Explosión fracasa por completo en los primeros instantes, lo que sugiere que para entender nuestros orígenes últimos nos falta una pieza crucial del rompecabezas.

5
Nuestros orígenes cósmicos

Al principio se creó el universo. Eso enfadó a mucha gente, y la mayoría lo consideró un mal movimiento.

Douglas Adams en
El restaurante del fin del mundo[13]

¡Oh, no, se está durmiendo! Estamos en 1997 durante una conferencia que imparto en la Universidad Tufts, y el legendario Alan Guth ha venido desde el MIT para oírme. Nunca antes había coincidido con él, y para mí era un honor que aquella lumbrera se encontrara entre el público, aunque también fue una fuente de nervios. Muchos nervios. Sobre todo cuando empezó a dejar caer la cabeza sobre el pecho y a poner los ojos en blanco. En un arrebato de desesperación, probé a expresarme con mayor entusiasmo y a cambiar el tono de voz. Aquello sirvió para que se sobresaltara en un par de ocasiones, pero mi fiasco no tardó en ser total: se ausentó al país de los sueños y no regresó hasta el final de mi intervención. Me sentí hundido.

Mucho después, cuando coincidimos como compañeros en el MIT, reparé en que Alan se duerme en *todas* las conferencias (salvo en las suyas). De hecho, mi alumno de posgrado Adrian Liu me informó de que yo mismo he empezado a hacerlo, y que nunca me he dado cuenta de que a él también le pasa porque siempre seguimos el mismo orden. Si Alan, yo y Adrian nos sentamos juntos en este orden, nos convertimos sin remedio en una versión amodorrada de «la ola» que tanto practican los aficionados al fútbol.



Figura 5.1: Andréi Linde (izquierda) y Alan Guth (derecha) durante una fiesta sueca de marisco, inconscientes de que los estaba retratando y de que tendrían que vestirse de otra guisa para recibir los prestigiosos premios Gruber y Milner con los que fueron reconocidos como los dos arquitectos principales de la inflación.

Alan me encanta. Es una persona tan cálida como inteligente, aunque el orden no es su fuerte: la primera vez que visité su despacho, me encontré la mayor parte del suelo cubierto por una capa gruesa de correspondencia sin abrir. Cogí un sobre al azar como quien toma una muestra arqueológica, y vi que el matasellos era de más de una década atrás. En 2005 consolidó su patrimonio y ganó el prestigioso premio al despacho más caótico de Boston.

¿Qué falla en la Gran Explosión?

Pero aquel premio no constituye el único logro de Alan. Allá por 1980 se enteró por el físico Bob Dicke de que los primeros instantes de la versión de Fridman del modelo de Gran Explosión plantean problemas importantes, así que él propuso una solución revolucionaria que denominó *inflación*[14]. Tal como hemos visto en los dos últimos capítulos, la extrapolación hacia atrás en el tiempo de las ecuaciones de Fridman sobre nuestro universo en expansión se tradujo en un gran éxito, porque explica con precisión por qué se alejan de nosotros las galaxias distantes, por qué existe la radiación cósmica de fondo, cómo surgieron los átomos más ligeros, y muchos otros fenómenos observados.

Viajemos hacia atrás en el tiempo hasta un instante próximo a los límites del conocimiento humano, y en el que este universo se expandía tan deprisa que dobló su tamaño en el siguiente segundo. Las ecuaciones de Fridman dicen que antes de ese acontecimiento, nuestro universo tenía una densidad y una temperatura ilimitadas. En concreto, que hubo una especie de comienzo un tercio de segundo antes, cuando en este universo imperaba una densidad infinita, y todo se alejaba de todo a una velocidad también infinita.

Siguiendo los pasos de Dicke, Alan Guth analizó en detalle esta historia de nuestros orígenes más remotos y la notó muy forzada. Por ejemplo, él responde así cuatro de las preguntas cósmicas que planteamos al principio del capítulo 2:

P: ¿Qué dio lugar a la Gran Explosión?
R: No hay ninguna explicación, las ecuaciones se limitan a aceptar que ocurrió.
P: ¿Ocurrió la Gran Explosión en un solo punto?
R: No.
P: ¿En qué lugar del cosmos se produjo la Gran Explosión?
R: Ocurrió en todas partes, en una cantidad infinita de puntos y en todos ellos a la misma vez.
P: ¿Cómo pudo crearse un espacio infinito en un tiempo finito?
R: No hay ninguna explicación. Las ecuaciones se limitan a aceptar que en cuanto hubo espacio, ya tenía unas dimensiones infinitas.

¿Le parece que estas respuestas resuelven la cuestión y responden con elegancia todas sus dudas sobre la Gran Explosión? Si no es así, ¡está usted en buena compañía! De hecho, como veremos, hay incluso más cosas que el modelo de la Gran Explosión de Fridman no logra explicar.

El problema del horizonte

Analicemos con más detenimiento la tercera pregunta de la lista anterior. La figura 5.2 ilustra que la temperatura del fondo cósmico de microondas es casi idéntica (con una concordancia de unos cinco decimales) en distintas direcciones del cielo. Si el estallido de la Gran Explosión hubiera ocurrido mucho antes en unas regiones que en otras, entonces cada región habría tenido distinta cantidad de tiempo para expandirse y enfriarse, y la temperatura en los mapas del fondo cósmico de microondas observado variaría de un lugar a otro casi un 100 % en lugar de un 0,002 %.



Figura 5.2: Mientras que las moléculas de café caliente y la leche fría tienen bastante tiempo para interaccionar entre sí y alcanzar la misma temperatura, el plasma de las regiones *A* y *B* nunca han tenido tiempo de interaccionar entre sí: aunque la información viajara a la velocidad de la luz aún no habría tenido tiempo de llegar de *A* a *B*, puesto que en la actualidad la luz de *A* solo ha llegado hasta nosotros, consumidores de café, que nos encontramos en medio de ambas regiones. El hecho de que a pesar de ello el plasma tenga la misma temperatura en *A* y en *B* constituye un misterio inexplicable mediante el modelo de la Gran Explosión de Fridman.

¿Y si algún proceso físico hubiera igualado las temperaturas mucho después de la Gran Explosión? Después de todo, si añadimos leche fría al café caliente, tal como se ilustra en la figura 5.2, no nos sorprenderá que todo se mezcle y alcance una temperatura uniforme y templada antes de beberlo. El problema es que este proceso de mezclado lleva tiempo: hay que esperar lo suficiente para que las moléculas de la leche y el café se desplacen por el líquido y se mezclen. Sin embargo, las regiones distantes del universo visible no han tenido tiempo de experimentar esa mezcla (Charles Misner y otros llamaron la atención sobre esto ya en la década de 1960). Tal como ilustra la figura 5.2, las regiones *A* y *B* que observamos en direcciones opuestas del cielo no han tenido tiempo de interaccionar entre sí: aunque la información viajara a la velocidad de la luz aún no habría podido llegar de *A* a *B*, porque la luz de *A* solo está llegando ahora al punto intermedio (donde nos encontramos nosotros). Esto significa que el modelo de la Gran Explosión de Fridman no explica en absoluto por qué *A* y *B* tienen la misma temperatura. Así que las regiones *A* y *B* parecen haber tenido la misma cantidad de tiempo para enfriarse desde la Gran Explosión, lo que debería significar que experimentaron una Gran Explosión de forma independiente casi al mismo tiempo y sin ninguna causa común.

Para entender mejor el desconcierto de Alan Guth ante este hecho, imagine cómo se sentiría usted si al mirar el correo electrónico se encontrara con la invitación de un amigo para comer. Y a continuación viera que el conjunto íntegro del resto de sus amistades también le ha enviado un mensaje independiente para invitarle a comer. Y que todos y cada uno de esos correos se enviaron al mismo tiempo. Probablemente pensaría que se trata de alguna suerte de conspiración, y que todos los mensajes tuvieron una causa común.

Tal vez sus amistades se comunicaron entre sí y decidieron organizarle una fiesta sorpresa, por decir algo. Pero para completar la analogía con el rompecabezas de la Gran Explosión de Alan, donde las regiones *A*, *B*, etc., se corresponderían con sus amigos, imagine que le consta que sus amigos no se conocen, ni se han comunicado jamás entre sí y nunca han tenido acceso a ninguna información común antes de enviarle esos mensajes. Entonces la única explicación posible sería que todo es obra de una repentina y demencial coincidencia. Demasiado descabellada para ser creíble, en realidad, así que probablemente concluiría que alguna de sus suposiciones contiene un error, y que sus amistades han tenido que comunicarse de algún modo. Eso mismo es lo que concluyó Alan: el hecho de que infinitas regiones separadas del espacio experimentaran estallidos de Gran Explosión a la vez no pudo ser una repentina y demencial coincidencia; algún mecanismo físico tuvo que causar tanto el estallido como la sincronización. Si una sola Gran Explosión ya es mala, una cantidad infinita de Grandes Explosiones perfectamente sincronizadas excede lo creíble.

Esto se conoce como el *problema del horizonte*, porque guarda relación con lo que vemos en el horizonte del cosmos, en las regiones más distantes que podemos observar. Y, por si esto fuera poco, Bob Dicke le habló a Alan de un segundo problema en la Gran Explosión de Fridman que él llamó el problema de la curvatura nula.

El problema de la curvatura nula

Tal como vimos en el capítulo anterior, hemos medido con una precisión elevada que el espacio es plano. Dicke sostenía que era algo sorprendente si el modelo de la Gran Explosión de Fridman es correcto, porque se trata de una situación altamente inestable, y no es de esperar que una situación inestable dure mucho tiempo. Por ejemplo, en el capítulo 3 hablamos de que una bicicleta detenida es inestable, porque cualquier desviación ligera del equilibrio perfecto se ve amplificada por la gravedad, así que nos sorprendería mucho ver que una bicicleta quieta y sin apoyos permanece en pie durante minutos y minutos. La figura 5.3 muestra tres soluciones a la ecuación de Fridman que ilustran la inestabilidad cósmica. La curva del centro se corresponde con un universo plano, que se mantiene perfectamente plano y se expande por siempre. Las otras dos curvas tienen un comienzo idéntico en la parte de la izquierda, con el espacio casi sin ninguna curvatura en absoluto, y después de una milmillonésima de segundo, sus densidades difieren tan solo en el último de los primeros 24 dígitos[15]. Pero la gravitación amplifica estas

diferencias minúsculas, y a lo largo de los siguientes quinientos millones de años, hace que el universo descrito por la curva inferior deje de expandirse y se contraiga de nuevo en una Gran Implosión *(Big Crunch)* cataclísmica, una especie de Gran Explosión pero a la inversa. En este universo que acaba comprimiéndose, el espacio se curva de forma que los ángulos de un triángulo suman mucho más que 180 grados. En cambio, la curva superior describe un universo que se curva de manera que esos ángulos suman mucho menos que 180 grados. Se expande mucho más deprisa que el universo plano, y en el momento presente tendría el gas demasiado diluido para formar galaxias, lo que le depararía el destino gélido y oscuro del «Gran Frío» *(Big Chill)*.

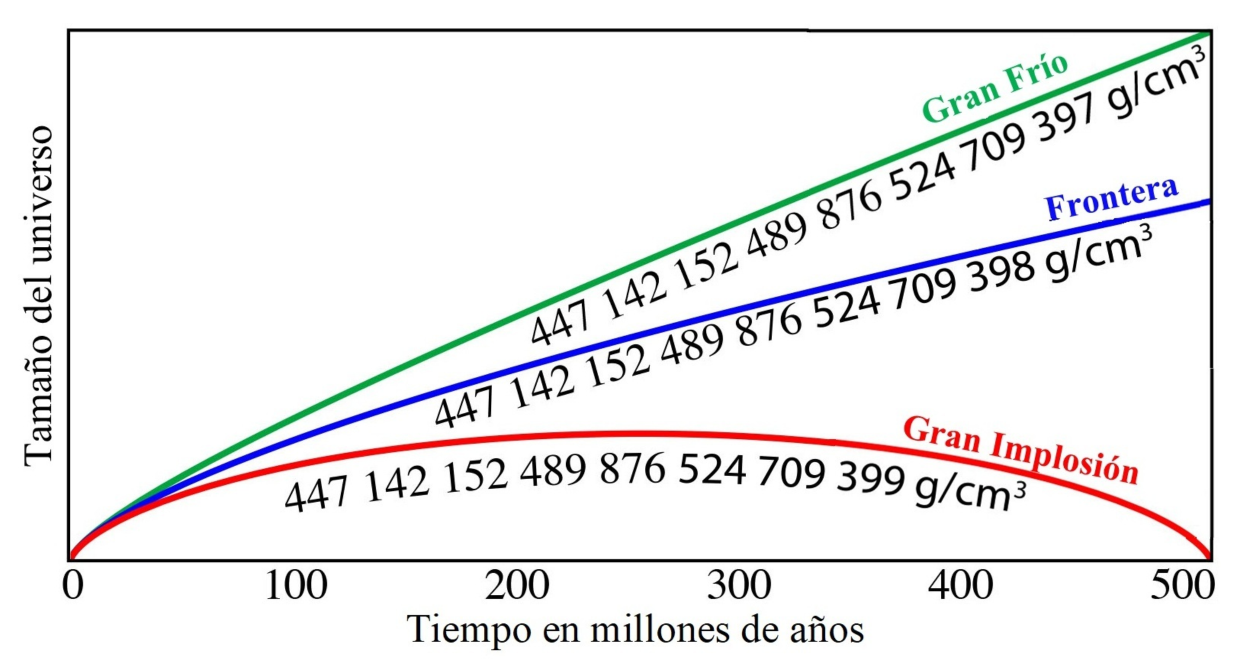


Figura 5.3: Otro misterio inexplicado en el modelo de la Gran Explosión de Fridman es por qué nuestro universo se ha mantenido durante tanto tiempo sin experimentar una curvatura considerable y sin sufrir una Gran Implosión o un Gran Frío. Cada curva se corresponde con una densidad ligeramente distinta en el instante en que este universo tenía una millonésima de segundo de edad. La situación fronteriza en que nos hallamos supone una inestabilidad elevada: la mera alteración del último de los primeros 24 dígitos habría desencadenado una Gran Implosión o un Gran Frío antes de que nuestro universo alcanzara el 4 % de su edad actual. (*Idea de la gráfica cedida por Ned Wright*).

Entonces ¿por qué es tan plano este universo? Si cambiamos los 24 dígitos de la figura 5.3 por valores aleatorios y resolvemos la ecuación de Fridman, la probabilidad de que salga un universo que se mantenga casi plano durante catorce mil millones de años es menor que la de dar en una diana situada en la Tierra lanzando un dardo al espacio sin mirar desde Marte. Sin embargo, el modelo de la Gran Explosión de Fridman no ofrece ninguna explicación para esta coincidencia[16].

Tal como afirmó Alan Guth, es indudable que algún mecanismo debió de provocar que este universo tuviera desde el primer momento la densidad justa necesaria para desarrollar una curvatura nula.

Cómo funciona la inflación

El poder de la duplicación

El razonamiento impactante de Alan fue que una sola hipótesis que suena un tanto rara permite resolver de un solo golpe tanto el problema del horizonte como el de la curvatura nula, y asimismo explicar muchas más cosas. Tal supuesto es que una vez hubo una minúscula gota uniforme de una sustancia cuya densidad es muy difícil de diluir. Esto significa que si un gramo de esa sustancia se expandiera en el doble de volumen, su densidad (la masa dividida entre el volumen) permanecería inalterada, así que se obtendrían dos gramos de esa materia. Comparemos esto con una sustancia normal, como el aire: si se expande en un volumen mayor (como cuando se libera el aire comprimido dentro de un neumático), entonces la cantidad total de moléculas permanece igual, así que la masa total sigue siendo la misma y la densidad disminuye.

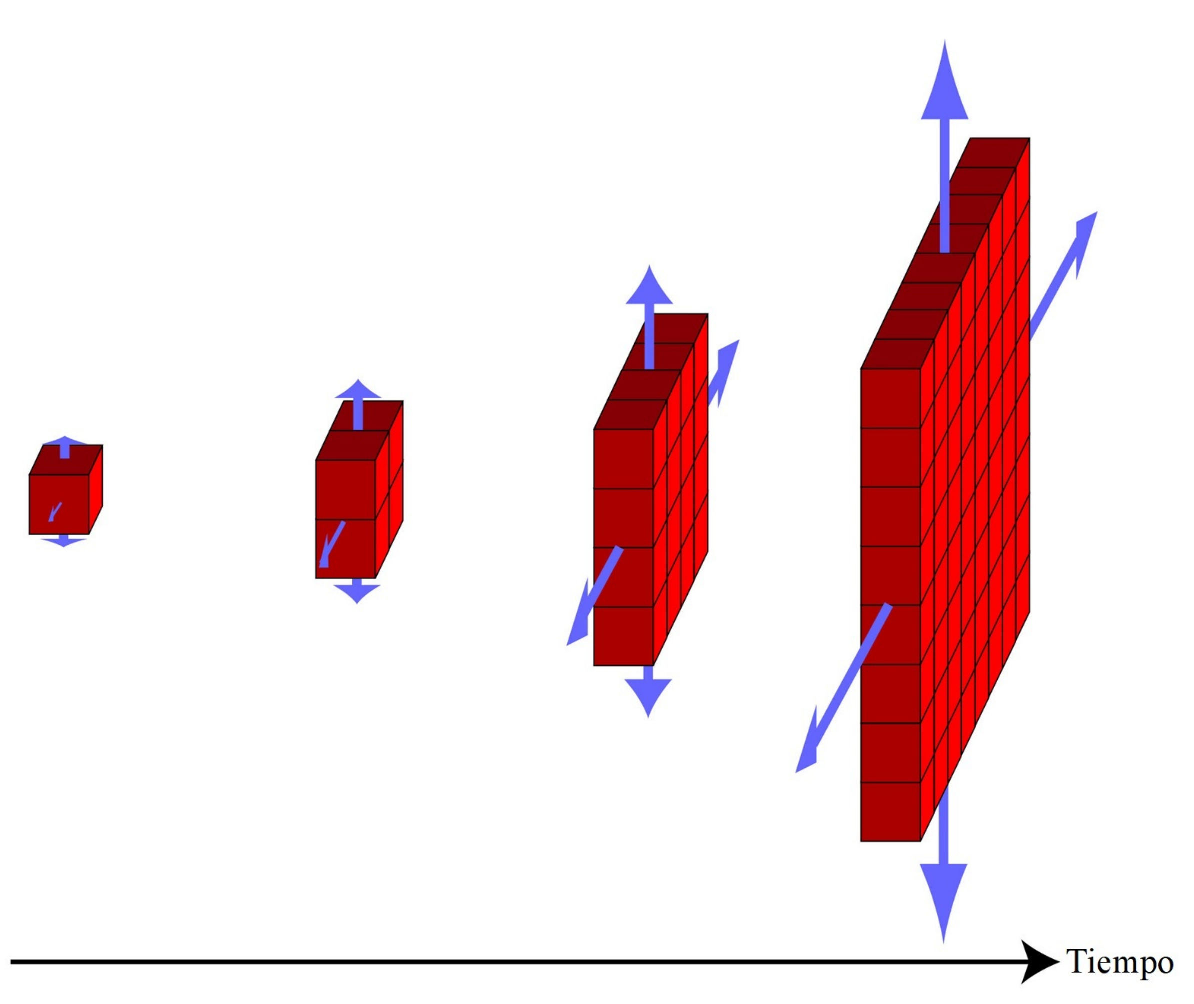


Figura 5.4: De acuerdo con la teoría de la gravitación de Einstein, una sustancia de densidad no diluible puede «inflarse» mediante la duplicación de su tamaño a intervalos regulares, y pasar en una fracción de segundo de tener unas dimensiones subatómicas a alcanzar un tamaño mucho mayor que el del universo observable, y provocar en efecto el estallido de la Gran Explosión. Esta duplicación reiterada ocurre en las tres dimensiones, así que la multiplicación por dos del diámetro multiplica el volumen por ocho. Aquí solo se representan dos dimensiones para ilustrar el fenómeno, lo que implica que al doblar el diámetro se cuadruplica el volumen.

De acuerdo con la teoría de la gravitación de Einstein, esa gota diminuta que no se diluye puede experimentar un estallido extraordinario que Alan llamó *inflación* y que, en efecto, ¡daría lugar a una Gran Explosión! Tal como ilustra la figura 5.4, las ecuaciones de Einstein tienen una solución en la que cada parte de esta gota duplica su tamaño a intervalos temporales regulares, un tipo de crecimiento que en matemáticas se denomina *exponencial*. De acuerdo con esta hipótesis, nuestro universo primigenio creció de un modo muy similar al de nuestras propias células justo después de la concepción (véase la figura 5.5): cada una de las células humanas se replica casi a diario, de forma que el número total de células de un individuo aumenta cada día al ritmo de 1, 2, 4, 8, 16, etc. La multiplicación sucesiva por dos es un proceso poderoso que daría problemas a las madres si siguiéramos doblando el peso a diario hasta el instante de nacer: tras nueves meses (después de unas 274

duplicaciones), ¡pesaríamos más que toda la materia conjunta del universo observable! Aunque suene demencial, eso es exactamente lo que hace el proceso de inflación de Alan: a partir de un punto mucho menor y más ligero que un átomo, duplica repetidas veces su tamaño hasta volverlo más masivo que el conjunto de todo el universo observable.

Problemas resueltos

Tal como se ve en la figura 5.4, la sucesiva duplicación del tamaño provoca la duplicación automática de la velocidad de expansión, lo que he indicado mediante flechas. En otras palabras, provoca una expansión acelerada. Si las personas siguiéramos doblando nuestra masa a diario hasta el momento de nacer, al principio nos expandiríamos bastante despacio (el tamaño de unas pocas células cada día). Pero hacia el final del periodo de gestación, cuando alcanzáramos un peso mayor que el de todo el universo observable, nos expandiríamos a la asombrosa velocidad de muchos miles de millones de años-luz al día. Si bien la masa de una persona se duplica una vez al día, nuestro universo inflacionario primigenio doblaba su masa con una frecuencia extrema. Así, según algunas de las versiones más aceptadas de la inflación, cada duplicación de la masa se produjo más o menos cada cien sextillonésimas (10^{-38}) de segundo, y se necesitaron unas 260 duplicaciones de la masa para crear toda la masa del universo observable. Esto significa que el proceso íntegro de inflación, de principio a fin, pudo ser casi instantáneo en términos humanos, puesto que habría durado menos de unos 10^{-35} segundos, menos de lo que tarda la luz en recorrer la billonésima parte

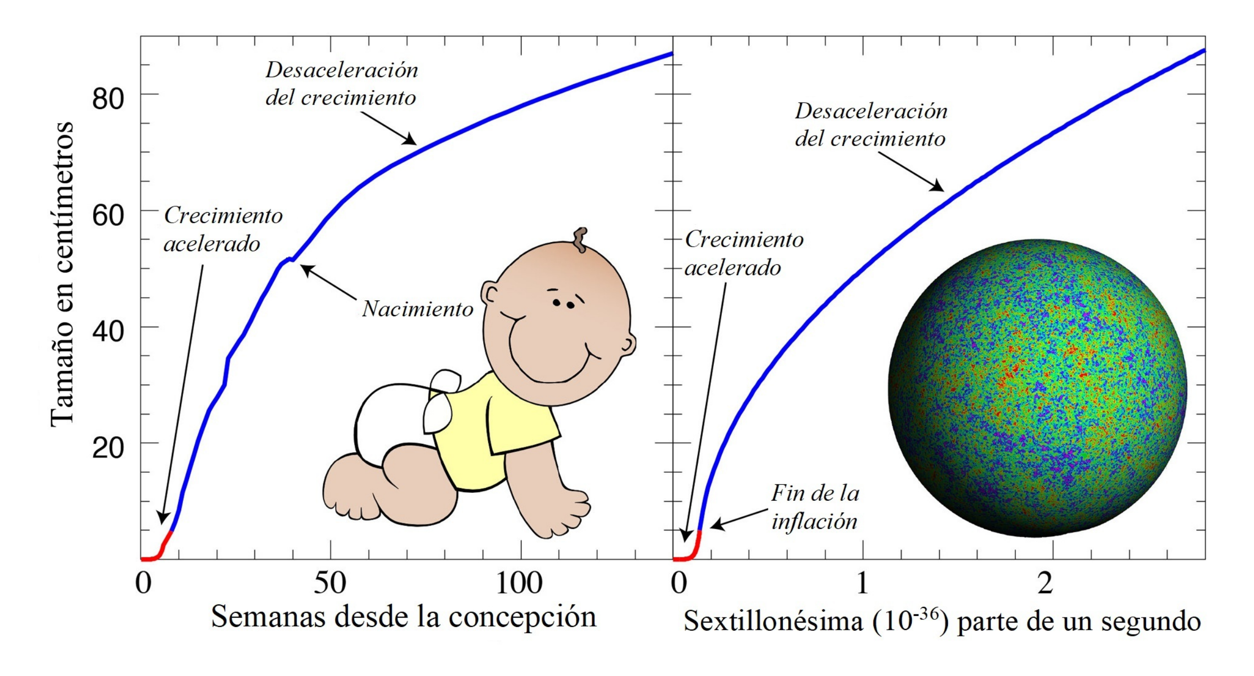


Figura 5.5: La teoría de la inflación dice que nuestro universo primigenio creció de un modo muy similar al de un bebé humano: con una fase de crecimiento acelerado en la que doblaba su tamaño a intervalos regulares seguida por otra fase de crecimiento más lento. Curiosamente, el eje vertical es idéntico en ambas gráficas: de acuerdo con el modelo más simple, este universo finalizó la etapa de inflación cuando alcanzó el tamaño aproximado de una naranja (aunque pesaba 10^{81} veces más). Nuestro universo primordial doblaba su tamaño unas 10^{43} veces más deprisa que las primeras células de un ser humano justo después de la concepción.

del tamaño de un protón. En otras palabras, la expansión exponencial parte de algo minúsculo que apenas se mueve y lo convierte en un estallido descomunal en expansión veloz. De este modo, la inflación resuelve el «problema de la explosión» porque explica qué causó la Gran Explosión: se debió a ese proceso de duplicaciones reiteradas. Asimismo explica por qué la expansión es uniforme, tal como descubrió Edwin Hubble: la figura 5.4 ilustra que las regiones situadas al doble de distancia unas de otras, se alejan entre sí el doble de rápido.

La figura 5.5 ilustra que, igual que la expansión corporal exponencial en usted dio paso a un crecimiento más pausado, también nuestro universo primigenio dejó de inflarse en cierto momento. El material inflacionario decayó y se convirtió en materia ordinaria que sigue expandiéndose a un ritmo más relajado, y que se deja llevar por la velocidad que adquirió durante la etapa inflacionaria explosiva y que poco a poco va frenando la gravitación.

Alan Guth se dio cuenta de que la inflación también resuelve el problema del horizonte. Las regiones distantes *A* y *B* de la figura 5.2 estuvieron muy juntas durante las primeras fases de la inflación, así que por entonces tuvieron tiempo de interaccionar. Más tarde, con la expansión explosiva de la inflación, perdieron el contacto y ahora están empezando a recuperarlo. En los humanos, una célula de la nariz tiene el mismo ADN que una célula del dedo del pie porque provienen del mismo progenitor: ambas surgieron a partir de la duplicación sucesiva de la primerísima célula que nos creó. Del mismo modo, las regiones distantes del cosmos tienen propiedades semejantes porque poseen un origen común: surgieron de la duplicación sucesiva de esa misma gota diminuta de materia inflacionaria.

Por si estos éxitos no fueran suficientes, Alan reparó también en que la inflación resuelve asimismo el problema de la curvatura nula. Imagine que es usted la hormiga de la esfera que aparece en la figura 2.7 y que solo es capaz de ver un área reducida de la superficie curva en la que vive. Si de repente la inflación volviera la esfera muchísimo mayor, esa pequeña región visible para usted parecería mucho más plana; un centímetro cuadrado de una pelota de tenis de mesa se aprecia curvado, mientras que un centímetro cuadrado de la

superficie terrestre es casi perfectamente plano. De manera análoga, cuando la inflación da lugar a una expansión sensacional de nuestro espacio tridimensional, el espacio contenido en cualquier centímetro cúbico particular se vuelve casi perfectamente plano. Alan demostró que si la inflación se prolonga lo bastante como para crear el universo observable, hará el espacio lo bastante plano como para que perdure hasta la actualidad sin una Gran Implosión o un Gran Frío.

De hecho, se suele considerar que la inflación dura mucho más que eso, lo que asegura que el espacio permanecerá perfectamente plano hasta el momento presente. En otras palabras, la teoría de la inflación efectuó una predicción verificable allá por los años ochenta: el espacio debería ser plano. Tal como vimos en los dos últimos capítulos, en la actualidad hemos realizado esa comprobación con una precisión mejor que el 1 %, ¡y la inflación superó la prueba con brillantez!

¿Quién pagó la barra libre definitiva?

La inflación es como un gran espectáculo de magia. Mi reacción visceral es: ¡Eso no puede obedecer a las leyes de la física! Pero al estudiarla con el detenimiento necesario, se ve que sí las obedece.

En primer lugar, ¿cómo es posible que un gramo de materia inflacionaria se convierta en dos gramos al expandirse? En efecto, la masa no se crea a partir de nada. Curiosamente, Einstein nos brindó una salida con su teoría de la relatividad especial, que dice que la energía E y la masa m guardan relación de acuerdo con la conocida fórmula $E = mc^2$. En este caso $c = 299\,792\,458$ metros por segundo, que es la velocidad de la luz y, como se trata de una cifra tan elevada, una pequeña cantidad de masa equivale a una cantidad inmensa de energía: menos de un kilogramo de masa liberó la energía de la explosión nuclear de Hiroshima. Esto significa que se puede aumentar la masa de algo añadiéndole energía. Por ejemplo, una cinta elástica se vuelve un poco más fuerte al estirarla: para estirarla hay que aplicar energía, y esa energía se traslada a la cinta elástica e incrementa su masa.

Una cinta elástica tiene *presión negativa* porque hay que realizar un trabajo para expandirla. En el caso de una sustancia con presión positiva, como el aire, ocurre al contrario: hay que realizar trabajo para comprimirla. En resumen, la sustancia inflacionaria tiene que tener presión negativa para obedecer las leyes de la física, y esta presión negativa tiene que ser tan inmensa que la energía necesaria para expandirla al doble de su volumen sea justo la suficiente para duplicar su masa.

Otra propiedad sorprendente de la inflación es que causa una expansión acelerada. En bachillerato me enseñaron que la gravitación es una fuerza de atracción así que, si tengo un puñado de materia en expansión ¿no debería la gravitación *frenar* la expansión para acabar invirtiendo el movimiento hasta que las cosas volvieran a juntarse? Einstein vuelve a acudir en nuestro rescate con una salida, esta vez sacada de su teoría de la relatividad general, que dice que la gravitación no solo se debe a la masa, sino también a la presión. Como la masa no puede ser negativa, la gravitación debida a la masa siempre es atractiva. Pero la presión positiva también causa gravitación atractiva, lo que significa que la presión negativa ¡genera una gravitación repulsiva! Acabamos de ver una sustancia inflacionaria que tiene una presión negativa inmensa. Alan Guth calculó que la fuerza gravitatoria repulsiva causada por la presión negativa es tres veces más intensa que la fuerza gravitatoria atractiva causada por la masa, ¡así que la gravitación de una sustancia inflacionaria la hará añicos!

En resumen, una sustancia inflacionaria produce una fuerza antigravitatoria que la disgrega por completo, y la energía que dedica esta fuerza antigravitatoria a expandir la sustancia crea suficiente masa nueva para que la sustancia mantenga una densidad constante. Este es un proceso automantenido, y la sustancia inflacionaria continúa duplicando su tamaño una y otra vez. De este modo, la inflación crea todo lo que alcanzamos a observar con nuestros telescopios a partir de casi nada. Esto animó a Alan Guth a decir que este universo es como la «barra libre definitiva»: ¡la inflación predice que la energía total que hay en él equivale casi a cero!

Pero, según el economista y premio Nobel Milton Friedman, «eso de la barra libre no existe», así que ¿quién pagó la cuenta energética de toda la abundancia de galaxias que observamos a nuestro alrededor en este universo? La respuesta es que lo hizo la gravitación, porque la fuerza gravitatoria inyectaba energía en la materia inflacionaria al estirarla. Pero si la energía total de todo no puede cambiar y los objetos pesados portan un montón de energía positiva, de acuerdo con la fórmula einsteiniana $E = mc^2$, entonces eso significa ¡que la gravitación tuvo que acaparar una cantidad equivalente de energía negativa! Y eso es exactamente lo que pasó. El campo gravitatorio, que es el responsable de todas las fuerzas gravitatorias, tiene energía negativa. Y adquiere más energía negativa cada vez que la gravitación acelera algo. Consideremos, por ejemplo, un asteroide distante. Si se mueve despacio, lleva muy poca energía cinética. Si se encuentra lejos del tirón gravitatorio de la Tierra, también tendrá poca energía gravitatoria (la llamada *energía*

potencial). Si poco a poco se aproxima a la Tierra, adquirirá gran velocidad y energía cinética, tal vez la suficiente para crear un cráter inmenso en caso de impacto. Como el campo gravitatorio comenzó casi sin energía y después liberó toda esa energía positiva, ahora ha adquirido energía negativa.

Acabamos de abordar otra pregunta de la lista que figura al principio del capítulo 2: La creación mediante inflación de la materia que nos rodea a partir de prácticamente nada ¿no contradice el principio de conservación de la energía? Ya hemos visto que la respuesta es *no*: toda la energía necesaria la cedió el campo gravitatorio.

Debo confesar que, aunque este proceso no viola las leyes de la física, me pone nervioso. No puedo evitar la preocupante sensación de que vivo en un timo piramidal de proporciones cósmicas. Cualquiera que visitara a Bernie Madoff antes de que lo arrestaran en 2008 por un desfalco de 65 000 millones de dólares, habría pensado que estaba bañado en una auténtica opulencia de la que era dueño. Pero un análisis más detallado evidenció que en realidad la había conseguido con dinero prestado. Con los años fue duplicando una y otra vez la escala de sus operaciones haciendo uso con astucia de un dinero que tomaba prestado de inversores ingenuos. Un universo inflacionario hace exactamente lo mismo: duplica su tamaño una y otra vez recurriendo a la energía que ya tiene para tomar prestada cada vez más energía del campo gravitatorio. Al igual que Madoff, este universo inflacionario explota una inestabilidad inherente al sistema para crear de la nada una opulencia aparente. Solo espero que este universo sea menos inestable que el de Madoff…

El tesoro inagotable

Otra inflación

Al igual que muchas teorías científicas exitosas, la inflación tuvo un mal comienzo. Su primera predicción firme, que el espacio es plano, parecía no concordar con indicios observacionales cada vez más abundantes. Tal como vimos en el capítulo anterior, la teoría de la gravitación de Einstein dice que el espacio solo puede ser plano si la densidad del cosmos es igual a un valor crítico particular. Usamos el símbolo Ω_{total} (o tan solo Ω u «omega», para abreviar) para indicar cuántas veces la densidad de nuestro universo supera esa densidad crítica, y la inflación predecía que $\Omega = 1$. En cambio, mientras

yo realizaba los estudios de posgrado, el perfeccionamiento de las mediciones de la densidad cósmica a partir de estudios de galaxias y otros datos, sugería un valor muy inferior de $\Omega \approx 0.25$, y Alan Guth se sentía cada vez más abochornado de tener que viajar de conferencia en conferencia insistiendo tercamente en que $\Omega = 1$, a pesar de las afirmaciones de sus colegas experimentales. Pero Alan se mantuvo en sus trece, y la historia acabó dándole la razón. Tal como vimos en el último capítulo, el descubrimiento de la energía oscura reveló que solo habíamos estado contando alrededor de la cuarta parte de la densidad total, y cuando incluimos la energía oscura, medimos que $\Omega = 1$ con una precisión mejor que 1 % (véase la tabla 4.1).

El hallazgo de la energía oscura confirió una credibilidad enorme a la inflación también por otra razón: ya no podía ignorarse por más tiempo la hipótesis de una sustancia no diluible, por loca y al margen de la física que pareciera, porque ¡la energía oscura es justamente esa sustancia! Así que la época de la inflación que creó la Gran Explosión finalizó hace catorce mil millones de años, pero ha comenzado un nuevo periodo de inflación. Esta nueva fase de inflación desencadenada por la energía oscura es igual que la anterior, solo que a un ritmo lento que duplica el tamaño de este universo cada ocho mil millones de años, no cada fracción de segundo. Por tanto, el debate interesante ya no estriba en si la inflación ocurrió o no, sino en si ocurrió una o dos veces.

La siembra de las fluctuaciones primordiales

La marca distintiva de una teoría científica exitosa es que se obtiene más de ella de lo que se introduce en ella. Alan Guth reveló que una suposición simple (la gota diminuta de una sustancia difícil de diluir) permitía resolver tres enigmas cosmológicos bien diferenciados: el problema de la explosión, el problema del horizonte y el problema de la curvatura nula. Antes vimos que la inflación hace más cosas: predice que $\Omega = 1$, lo que se confirmó con precisión unas dos décadas después. Sin embargo, no todo acaba ahí.

Concluimos el capítulo anterior preguntándonos de dónde salieron en última instancia las galaxias y la estructura cósmica a gran escala y, para gran sorpresa de todos, ¡la inflación respondió también esta pregunta! ¡Y menuda respuesta nos dio! La idea la habían planteado por primera vez dos físicos soviéticos: Gennadi Chibísov y Viacheslav Mujánov, y la primera vez que oí hablar de ella, me pareció absurda. Ahora, en cambio, creo que es una de las mejores candidatas para ofrecer el compendio de ideas más revolucionario y elegante de la historia de la ciencia.

En resumen, la respuesta es que las fluctuaciones primordiales del cosmos procedieron de la mecánica cuántica, la teoría del micromundo que analizaremos en los capítulos 7 y 8. Pero en la facultad aprendí que los efectos cuánticos solo son relevantes para las cosas más pequeñas que estudiamos, como los átomos, de modo que ¿cómo es posible que tengan alguna trascendencia para las cosas más grandes, como las galaxias? Bueno, uno de los prodigios de la inflación es que conecta lo minúsculo con lo colosal: durante las fases tempranas de la inflación, la región del espacio que ahora contiene la Galaxia fue mucho menor que un átomo, así que los efectos cuánticos pudieron ser importantes. Y de hecho lo fueron: tal como veremos en el capítulo 7, el llamado *principio de incertidumbre* de Heisenberg de la mecánica cuántica impide que cualquier sustancia, incluida la materia inflacionaria, sea completamente uniforme. Si intentamos volverla uniforme, los efectos cuánticos la obligan a revolverse y a deshacer la uniformidad. Cuando la inflación estiró una región subatómica hasta convertirla en todo el universo observable, las fluctuaciones en la densidad debidas a la mecánica cuántica también se ampliaron hasta alcanzar las dimensiones de galaxias, y aún mayores. Tal como vimos en el capítulo anterior, la inestabilidad gravitatoria se encargó del resto y amplificó esas fluctuaciones desde las minúsculas amplitudes del 0,002 % aportadas por la mecánica cuántica, hasta las espectaculares galaxias, cúmulos y supercúmulos de galaxias que ahora embellecen nuestro firmamento.

Lo mejor de todo es que eso no es mera palabrería cualitativa, sino una historia cuantitativa rigurosa donde todo se puede calcular con precisión. La curva del espectro de potencias que plasmé en la figura 4.2 es una predicción teórica de uno de los modelos más simples de la inflación, y me parece admirable que encaje tan bien con todas las mediciones. Los modelos de inflación también permiten predecir tres de los parámetros cosmológicos medidos que relaciono en la tabla 4.1. Ya he hablado de una de esas predicciones: $\Omega = 1$. Las otras dos guardan relación con la naturaleza de los patrones de estructura cósmica que analizamos en el último capítulo. En los modelos más simples de inflación, la amplitud de las fluctuaciones primordiales (llamada Q en la tabla) depende de lo rápido que duplique su tamaño la región inflacionaria, y con una duplicación cada 10^{-38} segundos, la predicción concuerda con el valor observado de $Q \approx 0{,}002\ \%$.

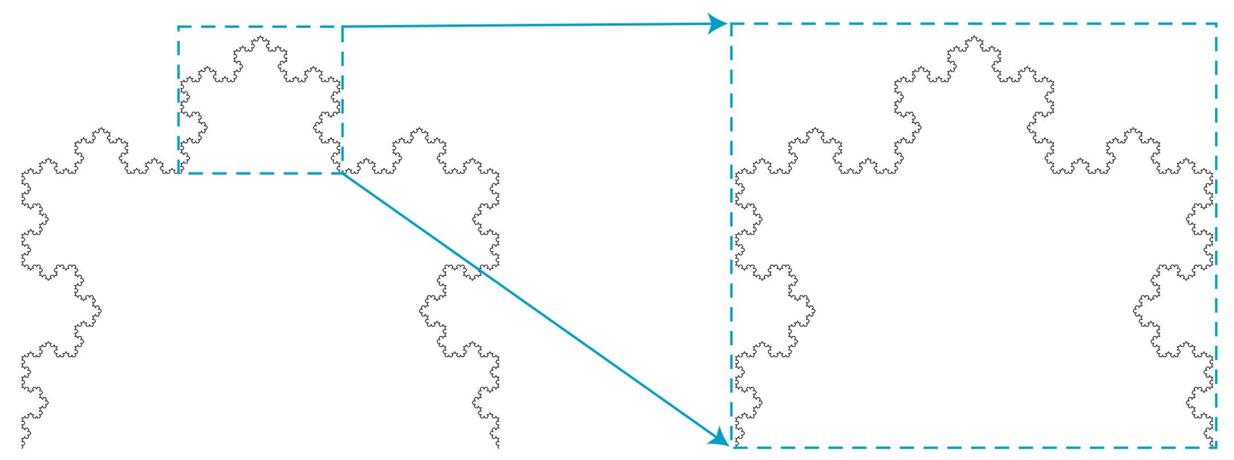


Figura 5.6: Este fractal apodado copo de nieve e inventado por el matemático sueco Helge von Koch, posee la asombrosa propiedad de que es idéntico a un fragmento aumentado de sí mismo. La inflación predice que nuestro universo primigenio era, de forma análoga, indistinguible de una porción aumentada de sí mismo, al menos en términos estadísticos aproximados.

La inflación también da una predicción interesante para el índice de la ley de potencias de las fluctuaciones primigenias (llamado n en la tabla). Para entender esto conviene mirar la silueta dentada de la figura 5.6, que ilustra lo que en matemáticas se denomina autosemejanza, fractal o invariancia de escala. Todos estos términos vienen a significar que si sustituimos la imagen por un trozo aumentado de ella misma, no se aprecia ninguna diferencia. Como esa ampliación se puede repetir tantas veces como se quiera, está claro que incluso una billonésima parte de la figura se verá idéntica a la figura completa. Curiosamente, la inflación predice que, con una buena aproximación, nuestro universo primigenio también tenía invariancia de escala, en el sentido de que no se apreciaría la diferencia entre un centímetro cúbico del mismo elegido al azar y una porción muy aumentada del mismo. ¿Por qué? Bueno, durante el periodo de inflación, incrementar este universo equivalía prácticamente a esperar un poco, hasta que todo volviera a duplicar su tamaño. Así que si pudiéramos viajar hacia atrás en el tiempo, visitar la época de la inflación y comprobar que las propiedades estadísticas de las fluctuaciones tenían invariancia de escala, sería equivalente a observar que esas propiedades no han cambiado con el tiempo. Pero la inflación predice que estas propiedades difícilmente cambian con el tiempo, por una sencilla razón: las condiciones físicas locales que generan las fluctuaciones cuánticas tampoco suelen cambiar con el tiempo, puesto que la sustancia inflacionaria no experimenta cambios notables de densidad ni de otras características.

El índice de la ley de potencias n de la tabla 4.1 mide cuánto se acercaba nuestro universo inflacionario a la invariancia de escala. Compara la cantidad de fluctuaciones a escalas grandes y pequeñas, y se define de manera que

$n = 1$ significa una invariancia de escala perfecta (fluctuaciones idénticas a todas las escalas), $n < 1$ significa más fluctuaciones en las escalas mayores, y $n > 1$ indica más fluctuaciones a pequeña escala. Mujánov y otros pioneros de la teoría de la inflación han predicho que el valor de n debería acercarse a 1. Aquel trabajo que realizamos a escondidas mi amigo Ted y yo con la computadora «Magicbean» de la que hablamos en el capítulo 4, sirvió para tomar la medida más precisa hasta la fecha de n. El resultado que obtuvimos fue $n = 1{,}15 \pm 0{,}29$, lo que confirmó que otra de las predicciones de la inflación también tenía buena pinta.

El asunto de n es incluso más interesante. Como la inflación tiene que acabar en algún momento, la sustancia inflacionaria tiene que ir diluyéndose muy poco a poco durante el proceso porque, en caso contrario, nada cambiaría, y la inflación continuaría para siempre. En los modelos más simples de inflación, este descenso de la densidad también atenúa la amplitud de las fluctuaciones producidas. Esto significa que las fluctuaciones generadas más tarde tienen menor amplitud. Pero las fluctuaciones generadas más tarde no tienen tiempo de estirarse tanto, así que se corresponden en la actualidad con fluctuaciones de escalas más pequeñas. El resultado de todo esto es la predicción de que $n < 1$. Para predecir algo más específico se necesita un modelo sobre la composición de la sustancia inflacionaria. El modelo más simple que existe para ello, adelantado por Andréi Linde (figura 5.1), se llama en lenguaje técnico *campo escalar con potencial cuadrático* (una especie de primo hipotético del campo magnético), y predice que $n = 0{,}96$. Ahora echemos otra ojeada a la tabla 4.1. En ella se ve que el valor de n se ha medido en la actualidad con una precisión unas 60 veces mayor que la alcanzada en aquellos días locos con la computadora «Magicbean», y que la medición más reciente es $n = 0{,}96 \pm 0{,}005$, ¡un valor muy cercano a la predicción!

Andréi Linde es uno de los iniciadores de la teoría de la inflación, y me ha inspirado mucho. A veces alguien explica algo que me parece complicado y cuando oigo la explicación de Andréi, me doy cuenta de que la cosa es sencilla si la pienso bien, es decir, tal como la piensa él. Tiene un sentido del humor sombrío, aunque entrañable, que sin duda lo ayudó a sobrevivir en la Unión Soviética, y tiene un brillo pícaro en los ojos ya sea para hablar de asuntos personales como para hablar de la ciencia más puntera.

El frío estremecimiento

Todas estas mediciones seguirán mejorándose en los años venideros. Asimismo, tenemos la capacidad de medir diversas cantidades adicionales predichas por los modelos de inflación. Por ejemplo, además de intensidad y color, la luz posee una propiedad llamada *polarización* (las abejas la perciben y la usan para guiarse, y aunque la vista humana no la note, las gafas de sol polarizadas solo dejan pasar luz con una polarización determinada). Muchos modelos consolidados de la inflación predicen una huella muy peculiar en la polarización de la radiación del fondo cósmico de microondas: fluctuaciones cuánticas durante la inflación generan lo que se conoce como *ondas gravitatorias*, vibraciones en el mismísimo tejido del espacio-tiempo, y estas distorsionan a su vez el patrón del fondo cósmico de microondas de un modo característico.

Una mañana de 2014, Alan Guth me envió un correo electrónico marcado como «CONFIDENCIAL» en el que me invitaba a acudir a una rueda de prensa que se celebraría en Harvard el 17 de marzo para anunciar un descubrimiento relacionado con esas ondas gravitatorias. ¡Guau! La sala estaba repleta de físicos y periodistas, y tanto Alan como Andréi eran todo sonrisas. John Kovac y sus colegas del experimento BICEP2 comunicaron que después de tres concienzudos años de meticulosas mediciones de microondas desde el polo sur, habían detectado ondas gravitatorias inmensas de casi mil millones de años-luz de longitud. Se necesita una violencia extrema para que se formen unas ondas gravitatorias tan intensas. Por ejemplo, una colisión cataclísmica entre dos agujeros negros que comprima una masa mayor que la del Sol en un volumen menor que el de una ciudad puede producir ondas gravitatorias que el experimento LIGO, con base en Estados Unidos, espera detectar, pero estas ondas solo tendrán un tamaño parecido al de los dos objetos que las generen.

Entonces, ¿qué pudo crear las descomunales ondas que afirman haber observado los científicos del proyecto BICEP2, si nuestro universo no parece contener ningún objeto lo bastante grande para producirlas? En mi opinión, la única explicación convincente sería que las formó la inflación mediante la violenta duplicación del tamaño del espacio en una cien sextillonésima (10^{-38}) de segundo y la repetición de este proceso un mínimo de 80 veces. Eso, si es que esas ondas descomunales existen de verdad. Un año después de la rueda de prensa del BICEP2, aquellas afirmaciones se han desinflado debido a los nuevos datos procedentes del satélite *Planck*, los cuales revelaron que toda la señal o parte de ella del BICEP2 se debe, no a la inflación, sino a polvo perteneciente a nuestra propia Galaxia. La caza continúa: el equipo del BICEP2 y otros experimentos competidores se afanan ahora por lograr

mediciones más sensibles, y los próximos deberán desvelar si existen o no ondas gravitatorias detectadles procedentes de la inflación.

Entonces, ¿hasta qué punto deberíamos tomarnos en serio la inflación? Había surgido como la teoría más lograda y defendida sobre lo que sucedió desde bien pronto, incluso antes de que se informara de las ondas gravitatorias, a medida que los experimentos fueron confirmando una a una todas sus predicciones: que nuestro universo tenía que estar en expansión, ser grande, más o menos homogéneo, isótropo y plano, con pequeñas fluctuaciones en las imágenes del cosmos primigenio que serían más o menos invariantes de escala, adiabáticas y gaussianas. Para mí y muchos de mis colegas cosmólogos, el hallazgo de ondas gravitatorias de una longitud descomunal aportaría la prueba definitiva para resolver esta cuestión, porque no tendríamos ninguna otra explicación sólida para ellas. Así que su detección implicaría, aunque parezca una locura, que la inflación sucedió de verdad: todo nuestro universo observable fue alguna vez mucho más pequeño que un átomo.

Si nos tomamos la inflación en serio, habrá que empezar a corregir a quienes afirman que la inflación ocurrió poco *después* de nuestra Gran Explosión, porque sucedió *antes* de ella, y fue lo que la produjo. Es impropio definir nuestra Gran Explosión Caliente como el inicio del tiempo, porque no sabemos si el tiempo tuvo en realidad un comienzo, y porque las primeras fases de la inflación no fueron ni especialmente calientes, ni especialmente grandes, ni parecidas a una explosión. A medida que aquella minúscula mota de sustancia inflacionaria doblaba su diámetro, digamos, unas 80 veces, las velocidades con las que cada una de sus partes se iban separando entre sí aumentaban en ese mismo factor de 280. Su volumen creció en ese factor elevado al cubo, es decir, 2^{240}, y lo mismo ocurrió con su masa, puesto que la densidad se mantenía más o menos constante. La temperatura de cualquier partícula que quedara de antes de la inflación no tardó en caer a casi a cero, de forma que el único calor remanente provenía de las mismas fluctuaciones cuánticas que generaron las ondas gravitatorias. En mi opinión, todo esto significa que las etapas primigenias o la inflación deben entenderse más bien, no como una Gran Explosión Caliente, sino como un Frío Estremecimiento, porque en aquel momento nuestro universo no era tan caliente (se volvió mil veces más caliente una vez que finalizó la inflación), ni tan grande (menos masivo que una manzana y de unas dimensiones inferiores a una milmillonésima del tamaño de un protón) ni tan explosivo (puesto que las

velocidades de la expansión eran un cuatrillón de veces más lentas que después de la inflación).

Inflación eterna

Lo comentado hasta ahora acerca de la inflación podría sonar como el típico ciclo vital de una idea física de éxito: teoría nueva resuelve antiguos problemas. Más predicciones. Confirmación a través de experimentos. Aceptación generalizada. Reescritura de libros de texto. Da la impresión de que ha llegado el momento de pronunciar ante la inflación el tradicional discurso científico de jubilación: «Muchas gracias, teoría de la inflación, por la lealtad y entrega con que ató algunos cabos sueltos relacionados con los orígenes últimos de este universo. Ahora, por favor, retírese a capítulos bien diferenciados del libro de texto, y permítanos continuar solos para trabajar en otros problemas más nuevos e interesantes que aún están pendientes de resolver». Sin embargo, igual que los docentes que envejecen batallando, ¡la inflación se niega a retirarse! Además de ser un tesoro inagotable dentro de su especialidad particular de la cosmología de nuestro universo primigenio, tal como hemos visto con anterioridad, la inflación ha deparado más sorpresas impactantes de las esperadas y, para algunos de mis colegas, también bastante indeseadas.

Imparable

La primera sorpresa es que la inflación suele negarse a detenerse, así que continúa produciendo espacio eternamente. Esto se descubrió con modelos específicos de Andréi Linde y Paul Steinhardt. Una demostración elegante de la existencia de este efecto la aportó Aleks Vilenkin, un afable profesor con voz suave de la Universidad Tufts, el mismo que me invitó a dar la charla con la que dormí a Alan Guth. En su época de estudiante en su Ucrania natal, rechazó una solicitud de la KGB para testificar en contra de un compañero de estudios que mantenía una actitud crítica con las autoridades, a pesar de la advertencia de que aquella negativa tendría «consecuencias». Aunque lo admitieron para estudiar un posgrado de física en la Universidad de Járkov, nunca le concedieron el permiso necesario para trasladarse allí, y tampoco consiguió acceder a trabajos normales. Aguantó un año ejerciendo como vigilante nocturno en un zoo antes de conseguir, por fin, salir del país. Siempre que me enervo con un funcionario pienso en la historia de Aleks, y la

frustración que siento se transforma en el reconocimiento agradecido de los pequeños que son mis problemas. Quizá esa determinación suya para aferrarse a lo que cree que está bien a pesar de la presión de la autoridad sirva para explicar por qué persistió y descubrió cosas que otros grandes científicos desestimaron.

Aleks averiguó que la cuestión de dónde y cuándo acaba la inflación es muy sutil e interesante. Sabemos que la inflación termina al menos en *algunos* lugares, ya que catorce mil millones de años atrás finalizó en la región del espacio que ahora habitamos. Esto significa que tiene que haber algún proceso físico capaz de eliminar la sustancia inflacionaria de manera que decaiga en materia normal no inflacionaria, la cual a continuación sigue expandiéndose, formando estructuras y, a la larga, dando lugar a galaxias, estrellas y planetas, tal como describimos en el capítulo anterior. Es bien sabido que la radiactividad hace que sustancias inestables decaigan en otras, así que supongamos que la sustancia inflacionaria adolece de una inestabilidad análoga. Esto significa que existe alguna escala temporal llamada *vida media* durante la cual decaerá la mitad de la sustancia inflacionaria. Tal como se ilustra en la figura 5.7, ahora nos encontramos ante un tira y afloja entre la multiplicación por dos causada por la inflación y la división entre dos que causa el decaimiento. Para que funcione la inflación, esta tiene que ganar la batalla, de forma que el total del volumen inflacionario aumente con el tiempo. Esto significa que el tiempo de duplicación de la sustancia inflacionaria tiene que ser más corto que su vida media. La figura ilustra tal ejemplo, donde la inflación triplica el tamaño del espacio mientras decae un tercio de la sustancia inflacionaria una y otra vez. Como se ve, el volumen total del espacio que aún se está inflando sigue duplicándose eternamente. Al mismo tiempo, el decaimiento del espacio inflacionario genera la producción continua de regiones del espacio no inflacionarias, así que la cantidad de volumen no inflacionario, donde la inflación ha cesado y pueden formarse galaxias, también continúa duplicándose.

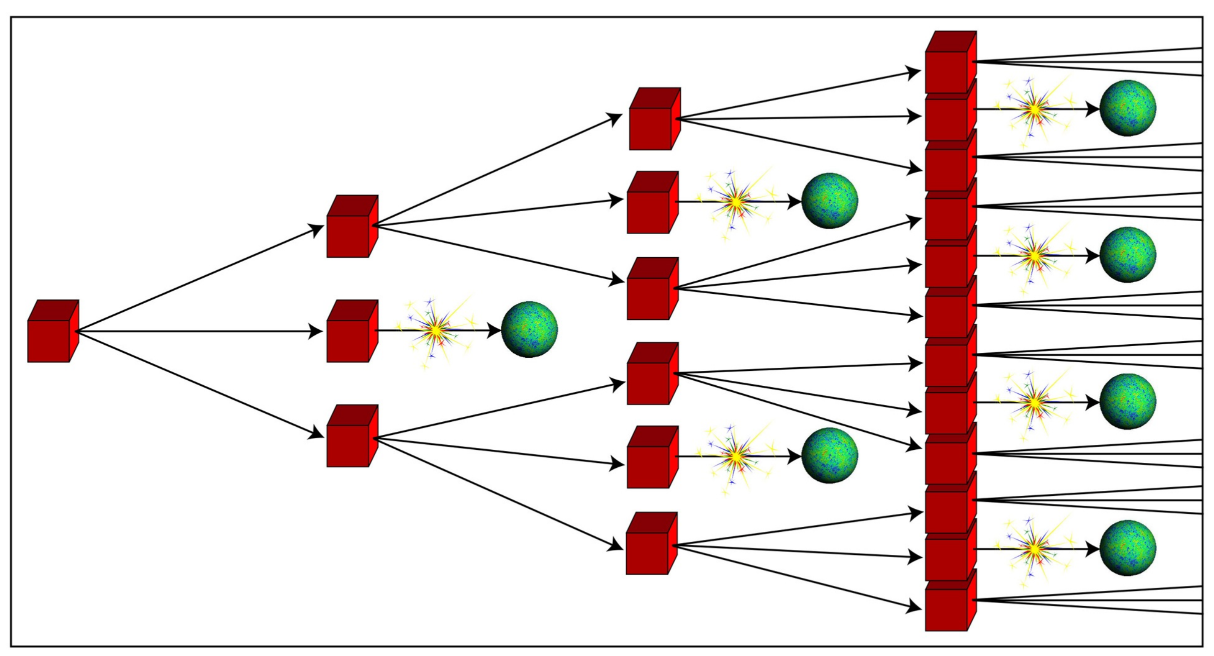


Figura 5.7: Representación esquemática de la inflación eterna. Por cada volumen de sustancia inflacionaria (simbolizado mediante un cubo) que decae en un universo de Gran Explosión no inflacionario como el nuestro, otros dos volúmenes inflacionarios no decaen, sino que triplican su volumen. El resultado es un proceso interminable en el que la cantidad de universos de Gran Explosión aumenta a un ritmo de 1, 2, 4, etc., es decir, se duplica en cada paso. Así que lo que consideramos nuestra Gran Explosión (uno de los resplandores) no es el comienzo de todo, sino el final de la inflación en nuestra región del espacio.

Esta propiedad perpetua de la inflación resultó ser más general de lo esperado en un primer momento. Andréi Linde, que acuñó el término *inflación eterna*, descubrió que hasta el modelo más simple de inflación que propuso él mismo, y sobre el que hablamos con anterioridad, experimentaba una inflación eterna mediante un elegante mecanismo relacionado con las fluctuaciones cuánticas que generaron nuestras fluctuaciones cosmológicas primordiales.

Hasta el momento actual, investigadores de todo el orbe han analizado en detalle un conjunto enorme de modelos de inflación, y se ha descubierto que casi todos ellos conducen a la inflación eterna. Aunque la mayoría de esos cálculos son bastante complejos, la ilustración esquemática de la figura 5.7 capta la esencia de por qué la inflación es eterna en general: para que funcione la inflación en primer lugar, la sustancia inflacionaria debe expandirse más rápidamente de lo que decae, y esto provoca de manera automática que la cantidad total de materia inflacionaria crezca sin límites.

El hallazgo de la inflación eterna ha transformado radicalmente nuestra percepción de lo que hay ahí fuera en el espacio a las escalas más grandes. Ahora no puedo evitar que la vieja interpretación me suene a cuento de hadas, con una línea argumental única en secuencia simple: «Había una vez una cosa llamada *inflación*. La inflación creó nuestra Gran Explosión. La Gran

Explosión creó las galaxias». La figura 5.7 ilustra por qué esta historia es demasiado ingenua: reproduce una vez más el error humano de dar por supuesto que todo lo que conocemos es todo lo que existe. Vemos que incluso la Gran Explosión no es más que una pequeña parte de algo mucho mayor, una estructura arbórea que aún está creciendo. En otras palabras, lo que he denominado nuestra Gran Explosión no fue el *comienzo* último, sino más bien el *final* de la inflación en nuestra región del espacio.

Cómo crear un espacio infinito en un volumen finito

Aquel pequeño del capítulo 2 me preguntó si el espacio sigue y sigue y no se acaba nunca. La inflación eterna da una respuesta clara: *el espacio no es solo inmenso, es infinito*. Y contiene una cantidad infinita de galaxias, estrellas y planetas.

Analicemos esta idea con más detenimiento. Aunque el carácter esquemático de la figura 5.7 no lo deje claro, aún estamos hablando de un solo espacio simplemente conexo. En este instante preciso (comentaremos el significado de esta expresión más adelante), algunas partes de este espacio se están expandiendo muy deprisa porque contienen materia inflacionaria, mientras que otras partes se están expandiendo más despacio porque en ellas ha cesado la inflación, y otras partes, como la región inmersa dentro de nuestra Galaxia, han dejado de expandirse por completo. Entonces, ¿la inflación tiene fin? La investigación detenida de la inflación que mencionamos con anterioridad evidencia que la respuesta es: sí y no. Termina, pero no termina en el siguiente sentido:

1. En casi todas las regiones del espacio, la inflación acabará terminando en una Gran Explosión como la nuestra.
2. Sin embargo, quedarán algunos puntos del espacio en los que la inflación nunca concluya.
3. El total de volumen inflacionario aumenta eternamente y se duplica a intervalos regulares.
4. El total de volumen posinflacionario que contiene galaxias también crece eternamente y se duplica a intervalos regulares.

Pero ¿significa esto de verdad que el espacio ya es infinito? Esto nos remonta a otra de las preguntas del capítulo 2: ¿Cómo pudo crearse un espacio infinito en un tiempo finito? Parece imposible. Pero, como ya he dicho, la inflación es como un espectáculo de magia en el que pasan cosas aparentemente

imposibles mediante el empleo ingenioso de las leyes de la física. De hecho, la inflación puede hacer algo aún mejor y que considero lo más impresionante de todo: *¡Crear un volumen infinito dentro de un volumen finito!* En concreto, puede partir de algo menor que un átomo y crear un espacio infinito en su interior que contenga una cantidad infinita de galaxias sin que ello afecte al espacio exterior.

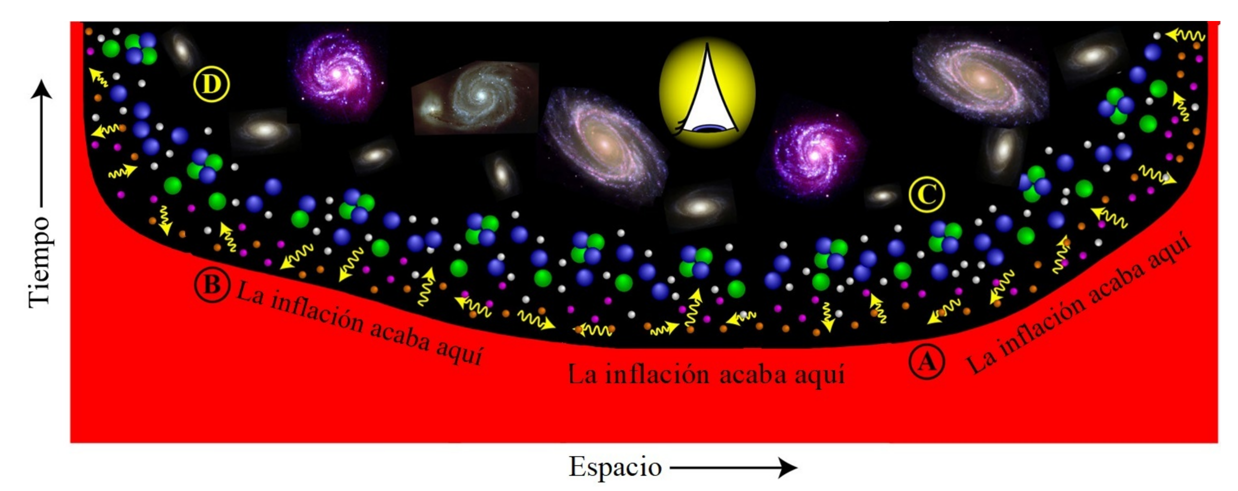


Figura 5.8: Como se detalla en el texto, la inflación puede crear un universo infinito dentro de lo que desde fuera parece un volumen subatómico. Una observadora situada en su interior vería el suceso *A* simultáneo a *B*, el suceso *C* simultáneo a *D*, vería la superficie infinita en forma de *U* donde acaba la inflación como su *tiempo cero*, la superficie infinita en forma de *U* donde se forman átomos como su *tiempo cuatrocientos mil años*, etc. Para simplificar, esta representación no incluye ni la expansión del espacio, ni dos de las tres dimensiones espaciales.

La figura 5.8 ilustra cómo ejecuta este truco la inflación. En ella se ve un corte en el espacio y el tiempo, donde los bordes izquierdo y derecho se corresponden con dos puntos donde la inflación no termina nunca, y el borde inferior equivale a un tiempo en el que toda la zona situada entre esos dos puntos se está inflando. Es difícil dibujar un espacio tridimensional en expansión, así que en la figura no aparecen representadas ni la expansión ni dos de las tres dimensiones espaciales, porque ninguna de esas dos complicaciones repercute en el razonamiento básico. Con el tiempo, la inflación acabará en todas partes salvo en los bordes izquierdo y derecho; la frontera curva ilustra el instante temporal exacto en que finaliza en cada lugar. Una vez que la inflación cesa en una región determinada, empieza a desarrollarse la historia tradicional de la Gran Explosión que explicamos en los dos últimos capítulos, donde un reactor de fusión cósmico a gran temperatura se enfría poco a poco mientras forma átomos, galaxias y, tal vez, observadores como nosotros.

Esa es la clave del truco: de acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein, una moradora de una de esas galaxias percibirá el espacio y el

tiempo de forma distinta a como las he definido yo mediante los ejes de la ilustración. Nuestro espacio físico no trae marcados los centímetros como una regla, ni este universo viene con un conjunto de relojes preinstalados, sino que cada observador tiene que definir su propia vara de medir y sus propios relojes, lo que a su vez determina su noción del espacio y el tiempo. Esta idea puede llevarnos a uno de los razonamientos centrales de Einstein, inmortalizado en la consigna «todo es relativo»: que distintos observadores pueden percibir el espacio y el tiempo de distinta manera. En particular, la simultaneidad puede ser relativa. Imagina que envías un correo electrónico a una amiga astronauta que está en Marte:

¡Hola! ¿Cómo van las cosas por ahí?

Diez minutos después, ella recibe el mensaje (transmitido a la velocidad de la luz mediante ondas de radio). Mientras esperas sus noticias, recibes un correo procedente de Nigeria en el que te ofrecen relojes Rolex baratos. Diez minutos después te llega la respuesta:

¡Bien, pero echo de menos la Tierra!

¿Qué pasó antes, la entrada en tu buzón del correo basura o el envío de la respuesta por parte de tu amiga astronauta? Curiosamente, Einstein descubrió que esta pregunta sencilla no tiene una respuesta sencilla, sino que la respuesta correcta ¡depende de la velocidad de la persona que responda! Por ejemplo, si viajo en una nave que se aleja zumbando de la Tierra camino de Marte, intercepto los tres mensajes y estudio la situación, concluiré que, de acuerdo con el reloj que llevo a bordo, tu amiga envió la respuesta antes de que recibieras el correo basura. Si viajara en sentido contrario, concluiría que recibiste la publicidad antes. ¿Lioso? Eso es lo que pensaron la mayoría de los colegas de Einstein cuando expuso la teoría de la relatividad, pero innumerables experimentos han confirmado desde entonces que así es como funciona el tiempo. La única situación en la que se puede afirmar con rotundidad que un acontecimiento en Marte sucedió antes que otro en la Tierra es cuando se dan las circunstancias siguientes: estando en Marte, observamos el evento en Marte y a continuación enviamos un mensaje a la Tierra, de modo que ese mensaje llegue a la Tierra antes de que los observadores terrestres observen el suceso terrestre.

Ahora apliquemos esto mismo al escenario de la figura 5.8. Para alguien situado fuera de esta región, tendrá sentido definir el espacio y el tiempo como las direcciones horizontal y vertical, respectivamente, tal como se representa en la figura, de manera que los cuatro sucesos que he marcado con círculos ocurren en el orden A, *B, C, D*. Es más, está claro que *B* ocurrió antes que *D*, porque cabe imaginar el envío de un mensaje de *B* a *D* y, de forma parecida, *A* ocurrió claramente antes que *C*. Pero ¿estamos seguros de que *A* ocurrió antes que *B*, teniendo en cuenta que ambos sucesos distan demasiado entre sí en el espacio para que la luz haya tenido tiempo de llegar de uno a otro? La respuesta de Einstein es que no. En realidad, para los moradores de una de esas galaxias tiene más sentido definir que la inflación acabó en un instante temporal concreto, puesto que el final de la inflación coincide con su Gran Explosión, así que, para ellos, los acontecimientos *A* y *B* son ¡simultáneos! Como se ve, la superficie rotulada con «La inflación acaba aquí» *no* es horizontal. De hecho, es infinita porque se curva como la letra *U* hacia los bordes izquierdo y derecho de la ilustración, donde aceptamos que la inflación nunca termina. Esto significa que, en lo que concierne a esos moradores, su Gran Explosión ocurrió ¡en un solo instante dentro de un espacio realmente infinito! ¿Y de dónde salió esa infinitud? Pues, como ve, se coló desde el infinito tiempo futuro disponible a medida que el eje del espacio se curva cada vez más hacia arriba.

De manera semejante, esos observadores concluirán que su espacio es infinito en épocas posteriores. Por ejemplo, si desarrollan un experimento basado en el fondo cósmico de microondas para tomar imágenes de su universo en ciernes cuando solo tenía cuatrocientos mil años de edad, la superficie de plasma que observarán se corresponderá con la superficie de la figura donde los protones y electrones se combinan para convertirse en átomos transparentes (invisibles) de hidrógeno. Como vemos que esta también es una superficie infinita en forma de *U*, la percepción será que cuando su universo tenía cuatrocientos mil años de edad era infinito. Asimismo, pensarán que los acontecimientos *C* y *D* son simultáneos, puesto que yacen dentro de la superficie en forma de *U* en el lugar donde se forman las primeras galaxias, y así sucesivamente. Como podemos acumular una cantidad infinita de estas figuras en forma de *U* unas dentro de otras, estos seres percibirán que su universo es infinito tanto en el espacio como en tiempo futuro, aunque todo el encaje perfectamente dentro de una región en su origen subatómica de acuerdo con la observadora situada en el exterior. El hecho de que el espacio se expanda en el interior no incrementa

necesariamente la cantidad de espacio que ocupa todo ello visto desde el exterior: recordemos que Einstein admite el estiramiento del espacio y la producción de más volumen a partir de nada, sin sacarlo de ningún otro lugar. En la práctica, este universo infinito podría parecer un agujero negro subatómico desde el exterior. De hecho, Alan Guth y sus colaboradores hasta exploraron la especulativa posibilidad de realizar este truco ellos mismos en la vida real: creando en laboratorio algo que desde fuera parezca un pequeño agujero negro y que desde dentro parezca un universo infinito, aunque todavía está por ver si sería posible. Para quien sienta deseos demiúrgicos, le recomiendo encarecidamente las instrucciones que da Brian Greene para «aspirantes a creadores de universos» en su obra *La realidad oculta*[17].

Comenzamos el análisis de la inflación en este mismo capítulo lamentando las respuestas poco satisfactorias que ofrecía la clásica teoría de la Gran Explosión de Fridman para algunos interrogantes básicos, así que ahora acabaremos el estudio revisando cómo los responde la inflación:

P: ¿Qué dio lugar a la Gran Explosión?
R: *La duplicación reiterada del tamaño de un punto subatómico explosivo de material inflacionario.*
P: ¿Ocurrió la Gran Explosión en un solo punto?
R: *Casi: comenzó en una región del espacio mucho más pequeña que un átomo.*
P: ¿En qué lugar del cosmos se produjo la Gran Explosión?
R: *En esa región diminuta, pero la inflación la estiró hasta que alcanzó el tamaño aproximado de una uva y creció tan deprisa que la expansión subsiguiente la volvió mayor que todo el espacio que vemos en la actualidad.*
P: ¿Cómo pudo nuestra Gran Explosión crear un espacio infinito en un tiempo finito?
R: *La inflación produce una cantidad infinita de galaxias al continuar para siempre. De acuerdo con la relatividad general, un observador situado en una de esas galaxias verá el espacio y el tiempo de manera distinta, de forma que percibirá el espacio como si fuera infinito ya desde el momento en que finalizó la inflación.*

En resumen, la inflación ha transformado de manera radical la visión que tenemos de nuestros orígenes cósmicos al reemplazar los incómodos interrogantes irresueltos del modelo de la Gran Explosión de Fridman por un

mecanismo simple que da lugar a la Gran Explosión casi a partir de la nada. Asimismo, nos ha aportado más de lo que le pedíamos: un espacio que no solo es inmenso, sino realmente infinito, con una cantidad infinita de galaxias, estrellas y planetas. Y, tal como veremos en el próximo capítulo, esto no es más que la punta del iceberg.

SUMARIO

- Las primeras fases del modelo de la Gran Explosión de Fridman plantean problemas serios.
- La teoría de la inflación los resuelve todos y explica el mecanismo que dio lugar a la Gran Explosión.
- La inflación explica por qué el espacio es tan plano, lo cual hemos medido con una precisión aproximada del 1 %.
- Explica por qué, en promedio, nuestro universo distante se ve igual en todas direcciones, con tan solo un 0,002 % de fluctuaciones de un lugar a otro.
- Explica los orígenes de ese 0,002 % de fluctuaciones como fluctuaciones cuánticas amplificadas desde una escala microscópica hasta una escala macroscópica por la inflación, y que con posterioridad la gravitación amplió hasta crear las galaxias y estructuras cósmicas a gran escala de la actualidad.
- La inflación explica incluso la aceleración cósmica (que valió un Premio Nobel en 2011): es una nueva inflación en movimiento lento que duplica el tamaño de este universo no cada fracción de segundo, sino cada ocho mil millones de años.
- La teoría de la inflación dice que este universo se desarrolló de un modo muy similar al de un ser humano: con una fase de crecimiento acelerado, en la que doblaba su tamaño a intervalos regulares, seguida por una fase de crecimiento más lento.
- Lo que llamamos Gran Explosión no fue un comienzo, sino un final, el de la inflación en nuestra parte del espacio, y lo normal es que la inflación prosiga eternamente en otros lugares.
- La inflación predice en general que el espacio no solo es inmenso, sino infinito, repleto de una cantidad infinita de galaxias, estrellas y planetas, cuyas condiciones iniciales fueron generadas aleatoriamente por fluctuaciones cuánticas.

6
Bienvenidos al multiverso

Si se eliminaran las puertas de la percepción, todo se revelaría al hombre tal como es, infinito.
Porque el hombre se ha encerrado tanto en sí mismo que todo lo ve a través de las estrechas rendijas de su caverna.

William Blake,
El matrimonio del cielo y del infierno

Hay dos cosas infinitas: el universo y la estupidez humana; y del universo no estoy seguro.

Sentencia atribuida a Albert Einstein

¿Listos para la controversia? La ciencia que hemos explorado hasta ahora en este libro constituye en la actualidad la dominante y consolidada. Pero ahora nos adentramos en la ciencia controvertida, esa que despertaría acalorados debates entre mis colegas físicos tanto en favor como en contra.

El multiverso del nivel I

¿Existe otra copia de usted con este libro entre las manos decidiendo dejarlo de lado sin terminar esta frase mientras usted continúa leyendo? ¿Una persona habitante de un planeta llamado Tierra, provisto de montañas brumosas, campos fértiles y ciudades en expansión, y perteneciente a un sistema planetario formado por otros siete planetas? La vida de esa persona ha sido idéntica a la suya en todos los aspectos… hasta ahora mismo, que es cuando la decisión de seguir leyendo marca la divergencia entre ambas vidas.

Seguramente le parecerá una idea peregrina e inverosímil, y debo confesar que también yo tengo esa misma reacción visceral. Pero parece que debemos resignarnos a vivir con ello, porque el modelo cosmológico más simple y aceptado hoy en día predice que esa persona existe de verdad en una galaxia situada a unos $10^{10^{29}}$ metros de aquí. Esta afirmación ni siquiera da por

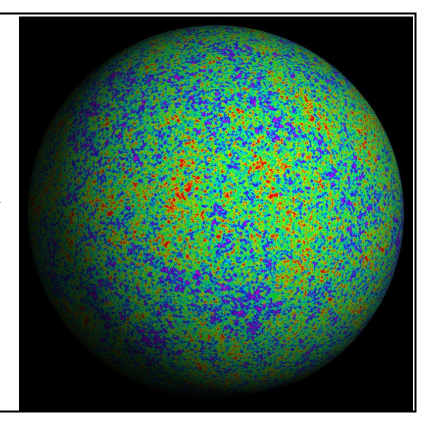
supuesta la física especulativa moderna, sino que se limita a asumir que el espacio es infinito y está lleno de materia con bastante uniformidad. Nuestro *alter ego* no es más que una predicción de la inflación eterna, la cual, como vimos en el capítulo anterior, concuerda con todos los indicios observacionales actuales y se toma de forma implícita como base para la mayoría de los cálculos y las simulaciones exhibidas en conferencias sobre cosmología.

¿Qué es un universo?

Antes de empezar a hablar en serio sobre otros universos, es crucial que tengamos claro a qué nos referimos con este universo. Esta es la terminología que usaremos en este libro:

Término	**Definición**
Realidad física	Todo lo que existe
Este universo	La parte de la realidad física que en principio podemos observar

Si ignoramos las complicaciones cuánticas del próximo capítulo, la definición de universo que sigue es equivalente a la anterior.

Este universo: La región esférica del espacio desde donde la luz ha tenido tiempo de llegar hasta nosotros durante los catorce mil millones de años transcurridos desde la Gran Explosión. Básicamente esto:	

En capítulos anteriores también nos referimos a esta región como el *universo observable*. Otros sinónimos más estrafalarios frecuentes entre los astrónomos son nuestro *volumen de horizonte*, o la región inmersa en nuestro *horizonte de partículas*. A los astrónomos también les encanta hablar de nuestro *volumen de Hubble*, de un tamaño similar, y definido como la región donde las galaxias se alejan más despacio que la luz.

Dado que es posible que existan otros universos, considero un tanto arrogante usar la expresión «el universo» para referirme al nuestro en particular, de ahí que procure evitar en todo momento el empleo de esa

denominación. Pero es evidente que se trata de una cuestión de gustos, puesto que los neoyorquinos llaman a su población *«the city»* (es decir, «la ciudad»), y los estadounidenses y canadienses denominan «Serie Mundial» al campeonato de béisbol que celebran conjuntamente.

Aunque tales designaciones le parezcan razonables, por favor, tenga en cuenta que hay quien las usa de manera diferente, y eso puede llevar a confusión. En concreto, hay gente que usa la expresión que yo rechazo, «el universo», para aludir a todo lo que existe, en cuyo caso, por definición, no puede haber ningún universo paralelo.

Ya que hemos definido este universo, ¿qué dimensiones tiene? Como hemos dicho, nuestro universo es una región esférica con la Tierra en el centro. La materia próxima a los confines de este universo, desde donde la luz no nos ha llegado hasta ahora después de catorce mil millones de años de viaje por el espacio, dista en la actualidad unos 5×10^{26} metros[18]. Por lo que sabemos hasta ahora, este universo contiene unas 10^{11} galaxias, 10^{23} estrellas, 10^{80}protones y 10^{89} fotones (partículas de luz).

Es una cantidad de materia verdaderamente grande, pero ¿podría haber más aún, en regiones del espacio más alejadas? Tal como vimos, la inflación predice que sí. Si existe, el universo de su doble (página 146) es una esfera del mismo tamaño centrada en esas regiones que no podemos ver y con las que no podemos tener contacto aún, porque ni la luz ni ninguna otra información procedente de allí han tenido tiempo de alcanzarnos. A esta región distante del espacio del tamaño de nuestro universo me gusta llamarla «universo paralelo *del nivel I*». El conjunto de todos los universos paralelos del nivel I forma el *multiverso del nivel I*. La tabla 6.1 define todos los tipos distintos de multiversos que exploraremos en este libro y de qué manera están interrelacionados.

A partir de la definición que hemos dado de *universo*, cabría esperar que la noción de que el universo observable no es más que una pequeña parte de un multiverso mayor perteneciera para siempre al ámbito de la metafísica. Pero la frontera epistemológica entre la física y la metafísica depende de si una teoría se puede comprobar por métodos experimentales, no de si es rara o si implica entidades no observables. Por eso, los avances experimentales basados en la tecnología han ampliado las fronteras de la física y han incorporado en ella conceptos cada vez más abstractos (y, al mismo tiempo, antiintuitivos), como una Tierra que rota sobre sí misma, el campo electromagnético, la desaceleración del tiempo a velocidades elevadas, las superposiciones cuánticas, el espacio curvo y los agujeros negros. Como

veremos más adelante, cada vez está más claro que las teorías basadas en la física moderna pueden ser, de hecho, comprobables empíricamente, predictivas y refutables, incluso aunque guarden relación con un multiverso. En el resto de este libro exploraremos hasta cuatro niveles distintos de universos paralelos, así que, para mí, la cuestión más interesante no es si existe un multiverso (ya que el nivel I no es tan controvertido), sino más bien cuántos niveles hay.

¿Cómo son los universos paralelos del nivel I?

Imaginemos que la inflación ocurrió de verdad y que generó nuestro espacio infinito. En tal caso, hay una cantidad infinita de universos paralelos. Es más, como se ve en la figura 5.8, todo el espacio infinito se creó repleto de materia que, de manera muy similar a lo que ocurre aquí en nuestro propio universo, fue formando de forma progresiva átomos, galaxias, estrellas y planetas. Esto significa que la mayoría de los universos paralelos del nivel I compartieron a grandes rasgos nuestra misma historia cósmica. Sin embargo, la mayoría de ellos difieren de este universo nuestro en los detalles, porque empezaron con ligeras diferencias. La razón de que así fuera estriba en que, como vimos en el capítulo anterior, las heterogeneidades primordiales responsables de toda la estructura cósmica fueron generadas por fluctuaciones cuánticas que, a todos los efectos prácticos, son aleatorias (véase la página 124).

La descripción física del mundo está dividida tradicionalmente en dos partes: cómo empiezan las cosas y cómo cambian. En otras palabras, a partir de unas condiciones iniciales, las leyes de la física especifican cómo evolucionan en el transcurso del tiempo. Los observadores residentes en universos paralelos del nivel I ven las mismas leyes de la física que nosotros, pero con unas condiciones iniciales distintas a las de nuestro universo. Por ejemplo, las partículas surgen en lugares ligeramente diferentes y se mueven a velocidades algo distintas. Estas pequeñas disparidades son las que a la larga establecen lo que sucede en esos universos: qué regiones se convierten en galaxias, qué regiones se convierten en vacíos intergalácticos, qué estrellas desarrollan planetas, qué planetas desarrollan dinosaurios, en qué planetas se extinguen los dinosaurios debido al impacto de un asteroide, etc. Dicho de otro modo, las discrepancias inducidas por la cuántica entre universos paralelos se amplifican con el tiempo y dan lugar a historias muy diferentes. En resumen, los estudiantes de universos paralelos del nivel I estudiarán lo mismo en la clase de física, pero verán contenidos distintos en la clase de historia.

Pero, antes que nada, ¿existen tales estudiantes? Parece muy improbable que la vida de usted haya resultado ser tal como es, porque para eso tuvieron que ocurrir muchas cosas: tuvo que formarse la Tierra, desarrollarse la vida, extinguirse los dinosaurios, sus padres tuvieron que conocerse, se le tuvo que ocurrir la idea de leer este libro, etc. Sin embargo, es evidente que la probabilidad de que todas esas circunstancias sucedieran no es nula, ya que, de hecho, se dieron aquí, en nuestro universo, y si lanzáramos los dados las veces suficientes, es seguro que ocurriría hasta lo más improbable. Si la inflación creó una cantidad infinita de universos paralelos del nivel I, las fluctuaciones cuánticas lanzaron en efecto los dados una cantidad infinita de veces, lo que garantiza al 100 % que la vida de usted sucederá en alguno de ellos. En realidad, en una cantidad infinita de ellos, puesto que una fracción minúscula de un número infinito sigue siendo un número infinito.

Un espacio infinito no contiene una única copia exacta de usted, sino que contiene mucha más gente que es casi igual que usted, con ligeras diferencias. Por tanto, si pudiera encontrarse con la persona de ese espacio más parecida a su vivo retrato, esa persona seguramente hablaría un idioma alienígena que usted no entendería y llevaría una vida bastante distinta de la suya. Pero de todas las personas iguales a usted existentes en los demás planetas, también habrá alguna que hable castellano, habite en un planeta idéntico a la Tierra, y haya tenido una existencia completamente indistinguible de la que ha llevado usted en todos los aspectos. Y la percepción subjetiva de esa persona será igualita a la que usted tiene. Sin embargo, podrá haber algunas diferencias mínimas en cuanto al movimiento de las partículas en el cerebro de su *alter ego* que serán demasiado sutiles para establecer una diferencia apreciable en este instante, pero que en cuestión de segundos harán que su doble deje a un lado este libro mientras usted sigue leyéndolo, lo que marcará el comienzo de la divergencia entre ambas existencias.

Esto plantea una cuestión filosófica interesante que volverá a aparecer y a ocuparnos en el capítulo 11: si hay muchas copias de «usted» con un pasado y unos recuerdos idénticos a los suyos, se esfuma la idea tradicional de determinismo: no es posible predecir el propio futuro, ¡ni tan siquiera aunque se conociera toda la historia pasada y futura del cosmos! La razón de que no se pueda radica en que no hay manera de precisar cuál de esas copias es «usted» (todas ellas sienten que lo son). Pero sus vidas empezarán a diferir con el tiempo, así que lo mejor que puede hacer es predecir las probabilidades de qué será lo que experimente a partir de ahora.

En resumen, en un espacio infinito creado por inflación, ocurre todo lo que pueda suceder de acuerdo con las leyes de la física, y ocurre una cantidad infinita de veces. Esto significa que existen universos paralelos en los que nunca le han puesto una multa de aparcamiento, donde usted tiene otro nombre, donde ha ganado una lotería de un millón de dólares, donde Alemania ganó la Segunda Guerra Mundial, donde los dinosaurios aún deambulan por la Tierra, y donde la Tierra ni siquiera llegó a formarse. Aunque cada una de estas situaciones se da en una cantidad infinita de universos, algunas suceden en una fracción mayor que otras, y al buscarle un sentido a ese hecho surgen multitud de cuestiones enigmáticas que abordaremos en el capítulo 11.

¿Son acientíficos los universos paralelos?

¡¡¡Un momento!!! ¿¿¿Pero es que me he vuelto loco??? Quiero decir, hasta ahora a lo largo de este libro he escrito sobre todo acerca de temas que espero que suenen más bien razonables. Sin duda, algunos de los hallazgos científicos sobre los que he hablado fueron controvertidos en su momento, pero al menos hoy cuentan con una aceptación generalizada, y de repente en este capítulo la cosa empieza a disparatarse. Esto último de que hay infinitas copias de nosotros haciendo todo lo imaginable parece una idea de locos. De un pirado. Así que, antes de seguir adentrándonos en esta madriguera de conejo, debemos hacer un alto en el camino para someternos a una prueba de cordura. Antes que nada ¿es científico hablar sobre estas cosas descabelladas que ni siquiera podemos observar, o hemos cruzado la frontera hacia la pura especulación filosófica?

Concretemos un poco más. El influyente filósofo austrobritánico Karl Popper popularizó este lema tan aceptado en la actualidad de «Si no es falsable, no es científico», entendiendo por *falsable* que exista la posibilidad de refutarlo. La física consiste en comprobar teorías matemáticas enfrentándolas a la observación: si una teoría no se puede comprobar ni siquiera de partida, entonces es lógico que sea imposible refutarla jamás, lo que, según la definición de Popper, significa que es acientífica. De ahí se deriva que lo único que puede aspirar a ser científico es una *teoría*. Lo que nos conduce a una cuestión muy importante:

> *Los universos paralelos no son una teoría, sino una predicción de algunas teorías.*

De teorías como la de la inflación. Los universos paralelos (en caso de existir) son *cosas*, y las cosas no pueden ser científicas, así que un universo paralelo no puede ser más científico que un plátano.

Por tanto, debemos replantearnos el interrogante sobre la especulación filosófica en términos de teorías, lo que nos lleva a la siguiente pregunta crucial:

¿Predicen las teorías la existencia de entidades no falsables y, por tanto, acientíficas? Aquí es donde considero que la cosa se pone realmente interesante, porque esta pregunta tiene una respuesta clara: para que una teoría sea falsable no es indispensable que se puedan observar y comprobar todas sus predicciones, basta con que se pueda hacer al menos con una de ellas. Veamos la siguiente analogía:

Teoría	**Predicción**
Relatividad general	Interior de agujeros negros
Inflación (capítulo 5)	Universos paralelos del nivel I
Inflación + paisaje (capítulo 6)	Universos paralelos del nivel II
Mecánica cuántica sin colapso (capítulo 8)	Universos paralelos del nivel III
Hipótesis de la realidad exterior (capítulo 10)	Universos paralelos del nivel IV

Como la teoría de la relatividad general de Einstein predijo con éxito muchas cosas que *podemos* observar, como el movimiento detallado de Mercurio alrededor del Sol, la curvatura de la luz por causa de la gravedad y el retardo de los relojes debido a la gravitación, la consideramos una teoría científica válida y también tomamos en serio sus predicciones sobre cosas que *no se pueden* observar, como por ejemplo, que el espacio continúa dentro del horizonte de sucesos de los agujeros negros[19] y que (en contra de lo que se pensaba antes) justo en el horizonte no ocurre nada interesante. De manera análoga, dadas las atinadas predicciones de la inflación descritas en los dos capítulos anteriores, es razonable tomarse también en serio el resto de sus predicciones, tanto las comprobables, por ejemplo con los datos que aporten futuros experimentos sobre el fondo cósmico de microondas, como las que parecen no demostrables, por ejemplo los universos paralelos. Los tres ejemplos finales de la tabla de la página 124 implican teorías que describiremos más adelante en este libro y que predicen otras clases de universos paralelos.

Otro aspecto importante de las teorías físicas es que si nos gusta alguna, debemos aceptarla como un bloque completo. No podemos decir «Bueno, me gusta cómo explica la relatividad general la órbita de Mercurio, pero no me

convencen los agujeros negros, así que optaré por eliminar este detalle del conjunto». No se puede comprar la relatividad general sin agujeros negros como se compra el café sin cafeína. La relatividad general es una teoría matemática rígida sin adaptaciones posibles; hay que aceptarla con *todas* su predicciones, o volver a empezar de cero e inventar una teoría matemática diferente que encaje con todas las predicciones logradas por la relatividad general al tiempo que prediga la imposibilidad de que existan los agujeros negros. Esto plantea unas dificultades extremas y, de momento, todas las tentativas al respecto han resultado infructuosas.

Del mismo modo, los universos paralelos no son opcionales dentro de la inflación eterna. Forman parte del paquete y, si no nos gustan, hay que encontrar una teoría matemática distinta que resuelva el problema de la explosión, el problema del horizonte y el problema de la curvatura nula, que genere las fluctuaciones cósmicas primordiales y que no pronostique universos paralelos. También esto se ha revelado complicado, por eso cada vez hay más físicos que, a menudo reticentes, empiezan a tomarse en serio los universos paralelos.

Indicios de universos paralelos del nivel I

Bien, pues ya hemos llegado a una conclusión: no debemos sentirnos culpables por hablar sobre universos paralelos en este libro, aunque se suponga un texto científico. Pero el hecho de que algo sea científico no implica que deba ser correcto, así que veamos con más detenimiento los indicios sobre los universos paralelos.

Con anterioridad dentro de este mismo capítulo vimos que el multiverso del nivel I, incluidos nuestros sosias, es una consecuencia lógica de la inflación eterna. También vimos que la inflación es la teoría más asentada hoy en día sobre el universo primigenio entre la comunidad científica, y que la inflación es eterna por lo común, así que da lugar al multiverso del nivel I. En otras palabras, el mejor indicio del multiverso del nivel I se corresponde con los indicios que tenemos de la inflación. ¿Demuestra eso que existe un doble suyo? ¡Por supuesto que no! En este momento no podemos estar seguros al 100 % de que la inflación sea eterna, ni tan siquiera de que llegara a ocurrir. Por suerte, el estudio de la inflación es una disciplina muy activa en la actualidad tanto desde la teoría como desde la experimentación, así que es probable que en años venideros tengamos más signos a favor o en contra de la inflación eterna (y, por consiguiente, a favor o en contra del multiverso del nivel I).

Todo lo comentado hasta ahora dentro de este capítulo ha estado dentro del contexto de la inflación. Pero ¿es que el multiverso del nivel I depende de la inflación? ¡En absoluto! Porque, para que no haya universos paralelos del nivel I, no puede haber ningún espacio más allá de la región visible del universo. No tengo un solo compañero científico que defienda un espacio tan reducido, y quien abogara por él sería como un avestruz con la cabeza enterrada en la arena diciendo que solo existe lo que alcanza a ver. Todos aceptamos la existencia de cosas que no vemos, pero que podríamos ver si nos desplazáramos o esperáramos un tanto, como los barcos ocultos tras el horizonte. Los objetos situados más allá de nuestro horizonte cósmico se hallan en una situación parecida, puesto que el universo observable crece como un año-luz al año a medida que la luz más distante tiene tiempo de alcanzarnos[20].

¿Y qué indicios hay de nuestros dobles? Si desmenuzamos los argumentos recién esgrimidos, vemos que aquella propiedad del multiverso del nivel I de que «todo lo que puede ocurrir, ocurre» deriva de dos supuestos lógicos claros que podrían darse incluso sin inflación:

1. Espacio y materia infinitos: *Desde el principio hubo un espacio infinito repleto de plasma caliente en expansión.*
2. Fluctuaciones primordiales aleatorias: *Desde el principio operó un mecanismo tal que cualquier región pudo experimentar cualquier fluctuación primordial posible, al parecer de manera aleatoria.*

Indaguemos en estos dos supuestos por separado. Creo que el segundo es bastante razonable con independencia de la inflación. Hemos observado que esas fluctuaciones primordiales de apariencia aleatoria existen; por tanto, sabemos que *algún* mecanismo las creó. Las meticulosas mediciones de sus propiedades estadísticas a través del estudio del fondo cósmico de microondas y de mapas de galaxias, indican que sus propiedades aleatorias concuerdan con lo que en estadística se conoce como «campo aleatorio gaussiano», lo cual satisface el supuesto 2. Es más, si la inflación no hubiera ocurrido y regiones distantes del espacio jamás hubieran tenido la capacidad de establecer contacto entre sí (figura 5.2), entonces estaría garantizado que este mecanismo haría rodar los dados de manera independiente en cada región.

¿Y qué hay del supuesto del espacio y la materia infinitos? Bueno, en cosmología se ha defendido tradicionalmente la idea de un espacio infinito con un contenido bastante uniforme de materia incluso mucho antes de que se inventara la inflación, y ahora forma parte de lo que se conoce como el

modelo cosmológico estándar. Pero este supuesto y sus implicaciones en el multiverso del nivel I solían generar controversia; de hecho, una afirmación de este tipo constituyó una de las herejías por las que el Vaticano quemó a Giordano Bruno en la hoguera en el año 1600. Quienes hemos publicado textos sobre este tema en tiempos más recientes, como George Ellis, Geoff Brundrit, Jaume Garriga y Aleks Vilenkin, nos hemos librado de la quema, pero aun así conviene que echemos una ojeada crítica al supuesto de la materia y el espacio infinitos.

En el capítulo 2 ya vimos que, aunque el modelo más simple del espacio (que se remonta a Euclides) es infinito, la relatividad general de Einstein permite varias soluciones elegantes para que el universo sea finito. Si el espacio se curva sobre sí mismo como una hiperesfera (figura 2.7), el volumen total de esa hiperesfera tendría que ser al menos 100 veces mayor que la parte que vemos de ella (nuestro universo) para explicar por qué la parte visible del espacio es tan plana que los experimentos con el fondo cósmico de microondas no han detectado la curvatura. En otras palabras, aunque viviéramos en un espacio finito del tipo hiperesfera, entonces hay al menos 100 universos paralelos del nivel I.

¿Qué hay del espacio finito en forma de toro (de rosquilla) que exploramos en el capítulo 2, donde el espacio es plano pero aun así permite regresar al punto de partida si se viaja determinada distancia? Un espacio así se parece a uno de esos juegos de ordenador en los que te sales de la pantalla por un lado y al instante reapareces en ella por el otro lado, así que si pudiéramos mirar al frente hasta una distancia suficiente, nos veríamos la cabeza por detrás, e infinitas copias nuestras a distancias regulares en todas direcciones, como si nos encontráramos dentro de una habitación forrada de espejos. Si nuestro espacio tuviera esta propiedad, ¿qué tamaño mínimo le correspondería? Claramente tendría que ser mucho mayor que la Galaxia, puesto que los telescopios no revelan infinitas copias de la Galaxia alineadas en filas ordenadas.

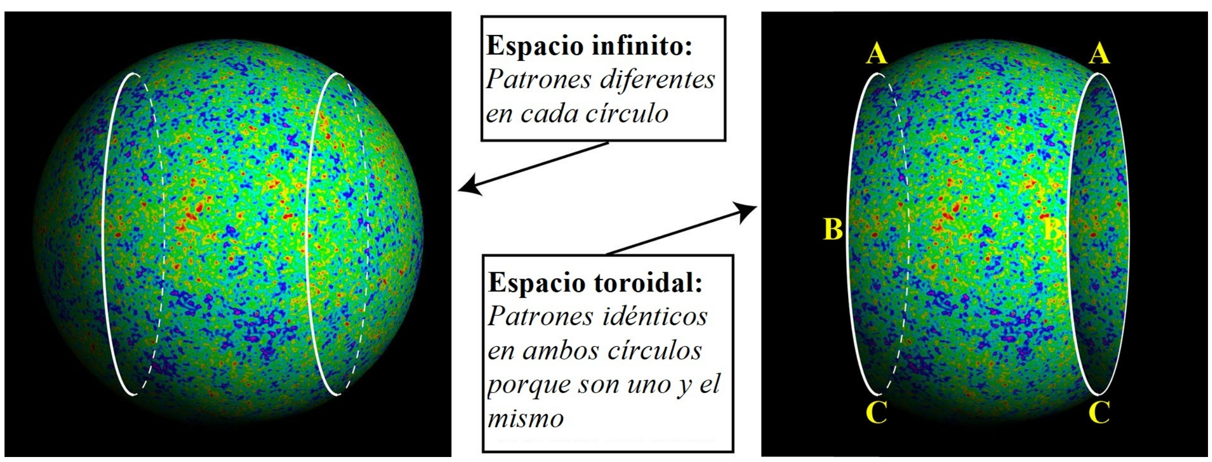


Figura 6.1: Si nos desplazáramos hacia la derecha más allá del círculo en el universo toroidal, reentraríamos de inmediato por el punto correspondiente del círculo de la izquierda: saldríamos por *A* y reentraríamos por *A*, etc. Las dos aes constituyen en realidad el mismo punto físico. Esto significa que deberíamos observar patrones similares en el fondo cósmico de microondas a lo largo de los dos círculos, ya que en realidad son uno y el mismo.

Pero si el tamaño ascendiera, por ejemplo, a diez mil millones de años-luz, esta prueba no nos serviría: no veríamos la copia más próxima de nuestra Galaxia porque diez mil millones de años atrás no existía. Por suerte, contamos con una prueba aún más sensible: podemos localizar un objeto reconocible, como una galaxia brillante, que diste cinco mil millones de años-luz de nosotros, y después buscar ese mismo objeto a cinco mil millones de años de distancia en la dirección opuesta. Pero también estas búsquedas nos han dejado con las manos vacías. La prueba más sensible de todas consiste en usar lo más distante que alcanzamos a divisar, el fondo cósmico de microondas, y buscar patrones semejantes en direcciones opuestas, como en la figura 6.1. Muchos equipos de investigación, Angélica y yo incluidos, lo han intentado sin encontrar nada. Asimismo, si el espacio tiene un volumen finito, solo caben ciertas frecuencias de perturbación, igual que el aire dentro de una flauta solo vibra en determinadas frecuencias especiales. Esto distorsiona el espectro de potencias del fondo de microondas de una manera particular que Angélica y otros han buscado sin éxito. En resumen, aún es posible que el espacio sea finito, pero los modelos de espacio finito han quedado muy restringidos por las observaciones en los últimos años, así que los únicos espacios aún admisibles tienen un volumen comparable al de nuestro universo, o incluso mayor. Esto complica verdaderamente eliminar al menos un puñado de universos paralelos. Es más, si hubiera un único universo en este momento se trataría de una rara coincidencia inexplicable; «¿Por qué ahora?», ya que habría habido más de un universo antes, cuando la luz aún no había tenido tiempo de llegarnos, sino desde una fracción de espacio menor que la de ahora.

Basta de espacio infinito. ¿Qué pasa con la parte de este supuesto dedicada a la materia infinita? Antes de la inflación se justificaba a menudo apelando al llamado *principio copernicano,* ese que afirma que los humanos no ocupamos un lugar especial en el cosmos: si hay galaxias a nuestro alrededor, también tiene que haberlas por todas partes.

¿Qué dicen las observaciones recientes sobre esto? En concreto, ¿cuánta uniformidad presenta la distribución de la materia a gran escala? En un modelo de «universo isla», donde el espacio es infinito pero toda la materia está confinada dentro de una región finita, casi todos los integrantes del multiverso del nivel I estarían muertos, porque consistirían nada más que en espacio vacío. Tales modelos gozaron de popularidad en el pasado. En sus orígenes la isla eran la Tierra y los objetos celestes que se observan a simple vista, mientras que a comienzos del siglo XX, la isla era la parte conocida de la Galaxia. El modelo de universo isla quedó desterrado por observaciones recientes. Los mapas tridimensionales de galaxias del capítulo anterior han revelado que la espectacular estructura observada a gran escala (grupos de galaxias, cúmulos, supercúmulos, murallas) da lugar a una uniformidad anodina a gran escala carente de estructuras coherentes mayores que unos mil millones de años-luz.

Cuanto mayor es la escala observada, más uniformidad se aprecia en la materia que conforma este universo (figura 4.6). Exceptuando la interpretación de teorías conspiratorias según las cuales nuestro universo se diseñó para confundirnos, las observaciones hablan alto y claro: el espacio tal como lo conocemos se muestra continuo mucho más allá de los confines de nuestro propio universo, repleto de galaxias, estrellas y planetas.

¿Dónde están los universos paralelos del nivel I?

Ya hemos visto que, en caso de existir, los universos paralelos del nivel I no son más que partes de nuestro espacio del tamaño de este universo y tan distantes que la luz aún no ha tenido tiempo de alcanzarnos desde allí. El hecho de que estemos en el centro de nuestro universo ¿significa que nos encontramos de algún modo en un lugar especial del espacio? Bueno, si deambulamos por un campo grande en el que la niebla impide la visibilidad a 50 metros, nos parecerá que estamos en el centro de una esfera de bruma más allá de la cual (como en el borde de nuestro universo) no se ve nada. Pero eso no significa que estemos en algún lugar especial, ni en el centro de nada fundamental, porque el resto de las personas que haya en ese campo se sentirán en el centro de su propia esfera de bruma. De la misma manera, los

observadores situados en cualquier lugar del espacio se sentirán en el centro de su universo. Asimismo, tampoco existe ninguna frontera física entre universos colindantes, de la misma manera que no hay ninguna delimitación especial si nos adentramos 50 metros más en la niebla: el campo y la niebla tienen las mismas propiedades allí que donde estamos nosotros. Es más, los universos pueden superponerse, del mismo modo que pueden hacerlo las esferas de bruma: igual que alguien situado a 30 metros de distancia llega a observarnos a nosotros dentro de su campo de visión y también divisa regiones que nosotros no alcanzamos a atisbar, el universo de alguien situado en una galaxia que diste cinco mil millones de años-luz de nosotros abarcará tanto la Tierra como regiones del espacio situadas fuera de nuestro universo.

Si la inflación eterna u otra cosa creó un número infinito de esos universos paralelos, ¿cuánto dista la copia idéntica del nuestro más cercana a nosotros? De acuerdo con la física clásica, un universo puede tener muchas disposiciones diferentes, así que no hay ninguna garantía de que alguna vez encontremos uno exactamente idéntico. Lo habitual es que haya infinitas opciones incluso para la distancia entre dos partículas, ya que para ello hay que especificar una cantidad infinita de decimales. Sin embargo, está claro que el colectivo de la civilización humana solo será capaz de distinguir en la práctica un número finito de posibilidades de universo, puesto que contamos con cerebros y computadoras capaces de almacenar tan solo una cantidad finita de información. Es más, solo podemos medir cosas con una precisión finita: el récord actual en física está en medir una cantidad hasta unas 16 cifras decimales.

La mecánica cuántica limita la diversidad incluso a un nivel fundamental. Tal como exploraremos en los próximos dos capítulos, la mecánica cuántica introduce una especie de borrosidad intrínseca en la naturaleza que implica que carezca de sentido plantearse dónde están situadas las cosas cuando se rebasa un cierto nivel de precisión. La consecuencia de esta limitación es que el número total de formas en que puede disponerse nuestro universo es finito. Una estimación conservadora, tirando por lo alto, es que como mucho hay $10^{10^{118}}$ formas posibles en las que puede disponerse un universo del tamaño del nuestro[21]. Un límite aún más conservador, conocido como el principio holográfico, dice que un volumen de las dimensiones de nuestro universo se puede organizar, como máximo, de $10^{10^{124}}$ maneras[22]. De otro modo habría que empaquetar tanto material dentro de él que generaría un agujero negro mayor que él mismo.

Estas son cifras enoooormes, mayores incluso que el célebre gúgolplex. Los niños pequeños suelen obsesionarse con las cosas grandes, y más de una vez he pillado a mis hijos jugando con sus amigos a ver quién decía números cada vez más altos. Después de los billones, cuatrillones, etc., llega un momento en que es inevitable que alguien lance la bomba *G*, el gúgolplex, a lo que siempre le sucede un silencio de asombro. Como es sabido, un gúgolplex es un uno seguido por un gúgol de ceros, mientras que 1 gúgol es un uno seguido de 100 ceros. Así que hablamos de $10^{10^{100}}$, que no es un 1 seguido de 100 ceros, ¡sino un 1 seguido de 10 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 ceros! Este número es tan elevado que, en principio, ni siquiera podría escribirse, puesto que está formado por más dígitos que átomos hay en nuestro universo. Siempre sospeché que Google era una empresa ambiciosa. Cuando la visité para dar una conferencia, descubrí que a su campus empresarial lo llaman Googleplex.

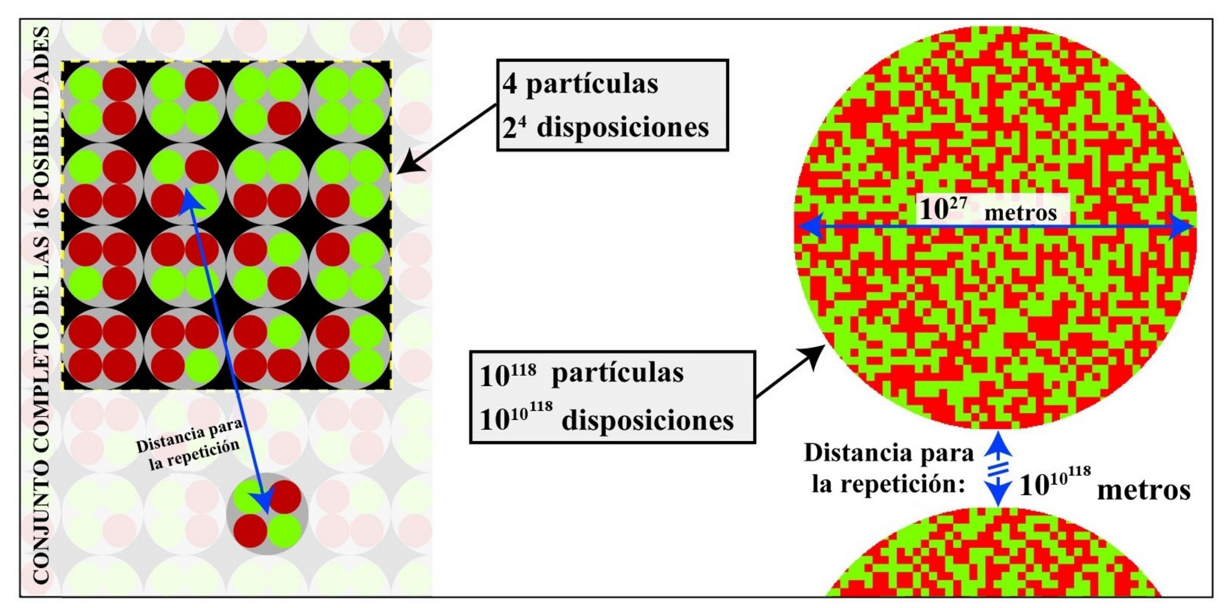


Figura 6.2: En un universo simplificado donde cada uno de cuatro lugares distintos puede portar una de entre dos clases de partículas, solo hay 24 disposiciones posibles (izquierda superior). Esto significa que en un multiverso de nivel I de tales universos, hay que mirar en promedio 16 universos para encontrar una repetición de un universo particular. Si, de forma análoga, nuestro universo puede contener $10^{10^{118}}$ partículas dispuestas de $10^{10^{118}}$ formas distintas, habrá que recorrer unos $10^{10^{118}}$ universos paralelos antes de llegar a una copia idéntica.

Aunque $10^{10^{118}}$ supera con creces lo astronómico, sigue siendo nada comparado con el infinito. Esto significa que si la inflación eterna creó un espacio formado por una cantidad infinita de universos paralelos del nivel I, nos encontraremos con que contendrá todas las posibilidades. En concreto, habrá que mirar una media de $10^{10^{118}}$ universos antes de localizar una copia

de cualquier clase particular de universo, tal como se ilustra en la figura 6.2. Así que si pudiéramos viajar en línea recta hasta llegar a la copia idéntica de nuestro propio universo más cercana a nosotros, tendríamos que recorrer la distancia equivalente a unos $10^{10^{118}}$ diámetros de nuestro universo. Si quisiéramos buscar en todas direcciones para localizar nuestra copia más cercana, la distancia a la más próxima viene a ser más o menos esta misma cantidad, lo que también es lo mismo que $10^{10^{118}}$ metros, dado el divertido comportamiento matemático de los dobles exponentes (potencias elevadas a potencias).

Más cerca, a unos $\sim 10^{10^{91}}$ metros de distancia, debería haber una esfera con un radio de cien años-luz idéntica a la que está centrada aquí, así que todas las percepciones que experimentemos durante el próximo siglo serán idénticas a las de nuestros equivalentes de allí. A unos $\sim 10^{10^{29}}$ metros de distancia, debería haber una copia idéntica de usted. De hecho, es probable que haya copias de usted mucho más cerca, puesto que la formación planetaria y los procesos evolutivos que inclinaron las probabilidades en su favor están ocurriendo en todas partes. Lo más seguro es que solo dentro del volumen de nuestro universo haya al menos 10^{20} planetas habitables.

El multiverso del nivel II

Con anterioridad he descrito la inflación como un tesoro inagotable, porque cada vez que nos parece imposible que prediga algo más revolucionario que lo anterior, va y lo hace. Si el multiverso del nivel I te pareció enorme y difícil de digerir, intenta imaginar un conjunto infinito de muchos de ellos independientes, algunos tal vez con leyes físicas aparentemente distintas. Andréi Linde, Aleks Vilenkin, Alan Guth y sus colegas han revelado que esta es la predicción típica de la inflación, y la llamaremos *multiverso del nivel II*

Muchos universos en un solo espacio

¿Cómo puede permitir la física esta locura? Bueno, en la figura 5.8 vimos que la inflación puede crear un volumen infinito dentro de un volumen finito. Tal como ilustra la figura 6.3, no hay ninguna razón que impida a la inflación hacer eso mismo en varios volúmenes adyacentes y que acabe dando lugar a diversas regiones infinitas (multiversos del nivel I), puesto que la inflación es eterna y nunca termina en las fronteras entre ellas. Esto significa que si usted

vive en uno de esos multiversos del nivel I, le resultará imposible visitar un multiverso vecino: la inflación continúa creando espacio intermedio más deprisa que la velocidad a la que se podría viajar a su través. Me imagino intentándolo con los niños en el asiento trasero del cohete:

—Papá, ¿falta mucho?

—Aún nos queda un año-luz por recorrer.

—Papá, ¿falta mucho?

—Aún nos quedan dos años-luz por recorrer.

En otras palabras, aunque esas otras zonas del multiverso del nivel II se encuentren en el mismo espacio que nosotros, distan más que infinito de nosotros, en el sentido de que nunca las alcanzaríamos aunque viajáramos eternamente a la velocidad de la luz. En cambio, en principio sí podemos viajar a una región situada a cualquier distancia dentro de nuestro multiverso del nivel I si tenemos la paciencia suficiente y la expansión cósmica se frena[23].

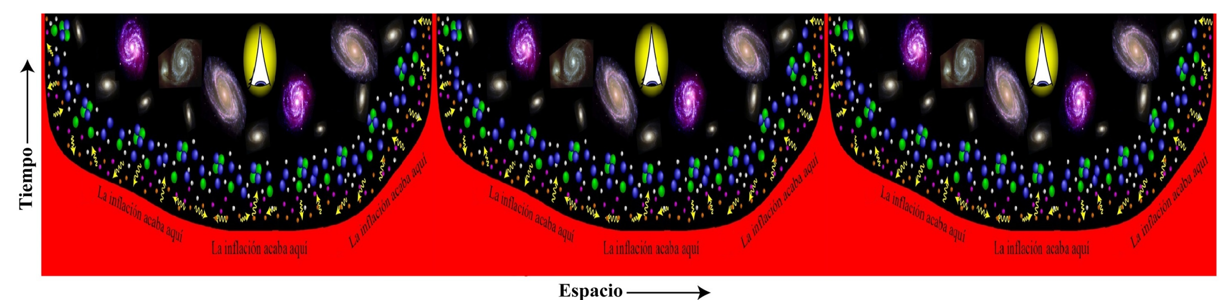


Figura 6.3: Si la inflación eterna crea tres regiones infinitas mediante el mecanismo de la figura 5.8, es imposible viajar de una a otra porque la inflación sigue creando espacio nuevo entre nosotros y nuestro destino más deprisa de lo que se puede viajar por él.

En la figura 6.3 he simplificado las cosas prescindiendo del hecho de que el espacio se está expandiendo. Las regiones en proceso eterno de inflación de la figura, las cuales he representado mediante líneas verticales que separan los multiversos del nivel I en forma de 17, se expandirán con rapidez y, a la larga, partes situadas en su interior dejarán de inflarse y darán lugar a regiones adicionales en forma de *U*. Con ello las cosas se ponen más interesantes, porque confieren al multiverso del nivel II una estructura arbórea, tal como se ilustra en la figura 6.4. Cualquier región sometida a la inflación sigue expandiéndose con rapidez, pero la inflación acaba cesando en varias de sus partes y crea regiones en forma de *U*, cada una de las cuales constituye un multiverso infinito del nivel I. El árbol continúa creciendo eternamente y sigue creando una cantidad infinita de regiones en forma de *U* que, juntas, forman el multiverso del nivel II. Dentro de cada una de estas regiones, el final de la inflación transforma la sustancia que se infla en partículas que a su

debido tiempo se concentrarán en átomos, estrellas y galaxias. A Alan Guth le gusta llamar «universo de bolsillo» a cada multiverso del nivel I, porque encaja perfectamente en una pequeña parte del árbol.

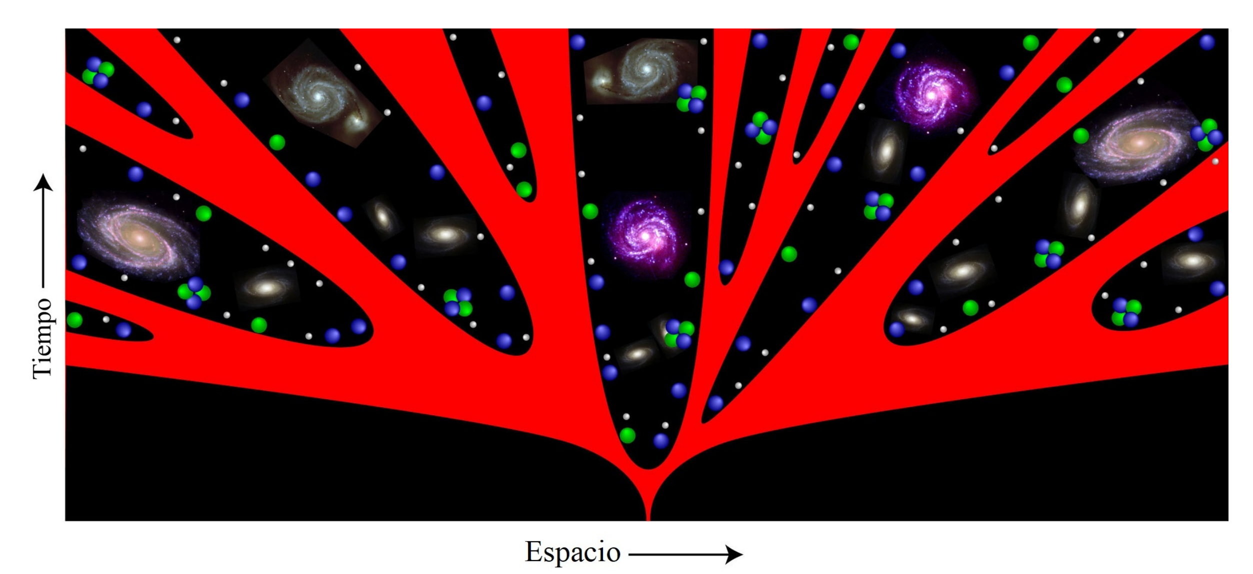


Figura 6.4: La expansión del espacio y el hecho de que la inflación siga acabando en ciertos lugares confiere al multiverso del nivel II una estructura en forma de árbol. La inflación continúa en la parte gris de aspecto arbóreo del espacio y el tiempo, y cada región en forma de *U* donde la inflación ha concluido es un multiverso infinito del nivel I.

¡Diversidad!

Con anterioridad, dentro de este mismo capítulo he comentado que el multiverso del nivel II puede contener infinitas regiones con leyes físicas aparentemente distintas. Pero esto suena absurdo: ¿Cómo es posible que las leyes de la física permitan la existencia de leyes físicas diferentes? Como veremos a continuación, la idea clave es que las *leyes fundamentales* de la física, que por definición rigen en todo lugar y en todo tiempo, pueden dar lugar a situaciones físicas complejas donde las *leyes efectivas* de la física deducidas por observadores conscientes varíen de un lugar a otro.

Si usted fuera un pez que llevara toda la vida en el océano, cometería el error de creer que el agua no es una sustancia, sino espacio vacío. Lo que un humano interpreta como una propiedad del agua, como por ejemplo la fricción cuando se nada en ella, usted lo consideraría una ley fundamental de la física: «Un pez que sigue un movimiento uniforme acabará en reposo, a menos que mueva las aletas». Seguramente usted no tendría ni idea de que el agua puede existir en tres estados distintos (sólido, líquido y gaseoso) ni de que eso que usted considera «espacio vacío» no es más que el estado líquido, una solución particular de las ecuaciones que describen el agua.

Puede que este ejemplo suene ridículo, y si un pez de verdad pensara así, tenderíamos a reírnos de él. Pero ¿podría ocurrir que lo que los humanos consideramos espacio vacío también fuera alguna clase de medio? Entonces el último en reír ¡lo haría de nosotros! De hecho, cada vez hay más signos de que las cosas son justamente así. No solo nuestro «espacio vacío» parece ser una especie de medio, sino que parece tener muchos más estados que tres, puede que 10^{500} y tal vez hasta infinitos, lo que deja abierta la posibilidad de que, además de curvarse, estirarse y vibrar, nuestro espacio también sea capaz incluso de hacer algo análogo a ¡la congelación y la evaporación!

¿Cómo han llegado los físicos a esta conclusión? Bueno, si un pez fuera lo bastante inteligente idearía experimentos y concluiría que su «espacio» se compone de moléculas de agua que obedecen a ciertas ecuaciones matemáticas. Tal como ilustra la figura 6.5, el estudio de esas ecuaciones le permitiría concluir que tienen tres soluciones diferentes correspondientes a las tres fases de hielo sólido, agua líquida y vapor gaseoso, aunque nunca haya visto ni un iceberg ni una chimenea volcánica submarina que genere vapor. De la misma manera, los físicos buscamos ecuaciones que describan nuestro propio espacio y lo que contiene. Aún no hemos llegado a la respuesta final, pero las respuestas aproximadas conseguidas de momento comparten una característica clave: tienen más de una solución (estado) que describe un espacio uniforme. La teoría de cuerdas, principal candidata a una respuesta definitiva, ha descubierto que tiene unas 10^{500} soluciones o más, y nada indica que otras teorías rivales, como la gravitación cuántica de lazos, arrojen una solución única. A los físicos les gusta denominar *paisaje* de la teoría al conjunto de todas las soluciones posibles[24]. Todas estas soluciones, cuyas propiedades constituyen leyes efectivas de la física, corresponden a diferentes posibilidades permitidas por las mismas leyes fundamentales de la física.

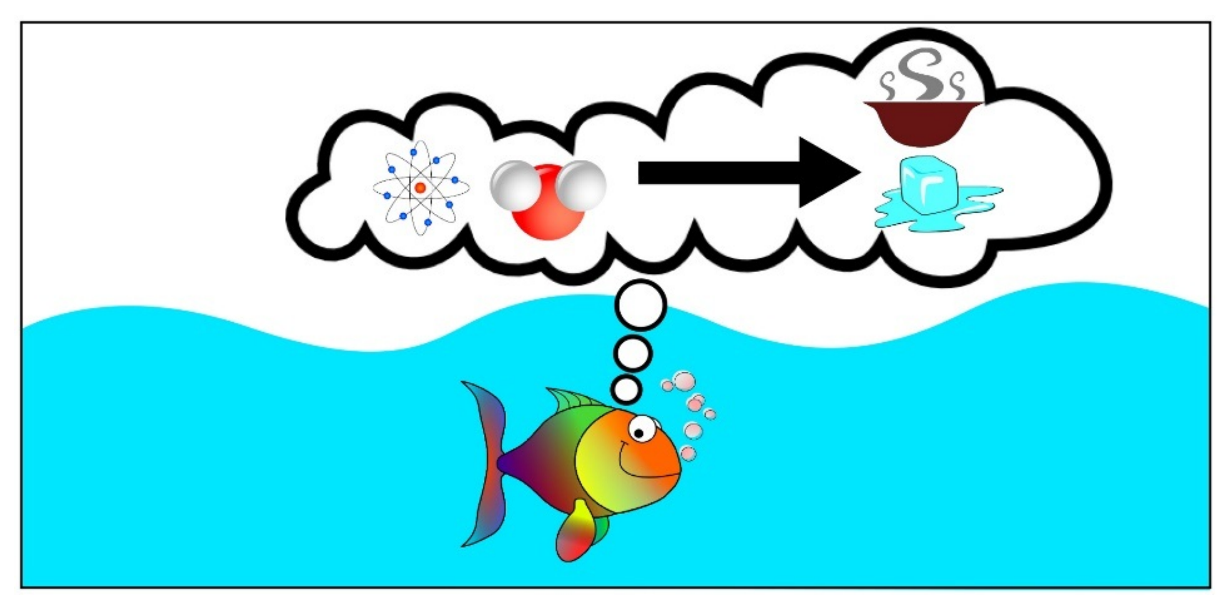


Figura 6.5: ¿Se puede congelar el espacio? Un pez pensaría que el agua es espacio vacío, porque es el único medio que conoce. Pero si un pez inteligente calculara las leyes físicas por las que se rigen las moléculas de agua, descubriría que tienen tres soluciones, «estados», diferentes correspondientes al agua líquida que él conoce, pero también al vapor y al hielo que nunca ha visto. Del mismo modo, lo que hasta ahora creíamos espacio vacío podría ser un medio con 10^{500} o más estados diferentes, de los cuales solo hemos experimentado uno.

¿Qué tiene esto que ver con la inflación? Curiosamente, la inflación eterna posee la propiedad de ¡crear todas las clases posibles de espacio! Produce todo el paisaje. De hecho, para cada estado que puede tener el espacio, crea una cantidad infinita de multiversos del nivel I repletos de espacio en ese estado. Esto significa que es fácil que los observadores nos dejemos engañar y cometamos el mismo error que el pez: como observamos un espacio con las mismas propiedades en todas partes dentro de nuestro universo, nos sentimos tentados a concluir erróneamente que el espacio es así también en todas partes.

¿Cómo logra esto la inflación? Bueno, se necesita gran cantidad de energía para que el espacio cambie de estado, así que los procesos que observamos a diario son incapaces de lograrlo. Pero allá por los tiempos de la inflación había una cantidad enorme de energía en cada pequeño volumen, la suficiente para que las fluctuaciones cuánticas ya mencionadas provocaran de tanto en tanto un cambio de fase en alguna región minúscula que, más tarde, se inflaría y convertiría en una región enorme que albergara tan solo esa fase. Es más, una región determinada del espacio debe encontrarse en un estado definido para dejar de inflarse. Esto garantiza que las regiones colindantes entre dos estados siguen inflándose por siempre, de forma que cada fase llena por completo un multiverso infinito del nivel I.

¿Y a qué se parecen esos estados diferentes del espacio? Imagine que le regalan un coche en su cumpleaños con la llave puesta en el contacto, pero que jamás ha oído hablar de coches con anterioridad, y que no sabe nada en absoluto sobre su funcionamiento. Como usted es una persona curiosa, accede al vehículo y empieza a trastear con los botones, mandos y palancas. Al final se hace una idea de cómo usarlo y acaba conduciendo bastante bien. Pero, sin que usted lo supiera, alguien eliminó la letra *R* de la palanca de cambios y manipuló la transmisión de forma que hay que aplicar una cantidad de fuerza increíble para dar marcha atrás. Esto quiere decir que, a menos que alguien se lo diga, es muy probable que usted jamás descubra que el coche también se mueve hacia atrás. Si le pidieran que describiera cómo funciona el coche, afirmaría erróneamente que, sin excepción, siempre que el motor está en marcha, cuanto más se pisa el acelerador, más rápido se mueve el coche hacia delante. Por el contrario, si en otro universo paralelo hubiera que aplicar una fuerza enorme para que el coche funcionara hacia delante, allí se llegaría a la conclusión de que esa extraña máquina funciona de manera diferente y solo se mueve hacia atrás.

Nuestro universo se parece mucho a ese coche. Tal como ilustra la figura 6.6, tiene un montón de «botones» que controlan su funcionamiento: las leyes por las que las cosas se mueven cuando les hacemos algo y demás, eso que en el colegio nos dijeron que son las leyes de la física, incluidas las constantes de la naturaleza. Cada posición de los botones se corresponde con uno de los estados del universo, así que, si hay 500 botones con 10 posiciones posibles, habrá 10^{500} fases distintas.

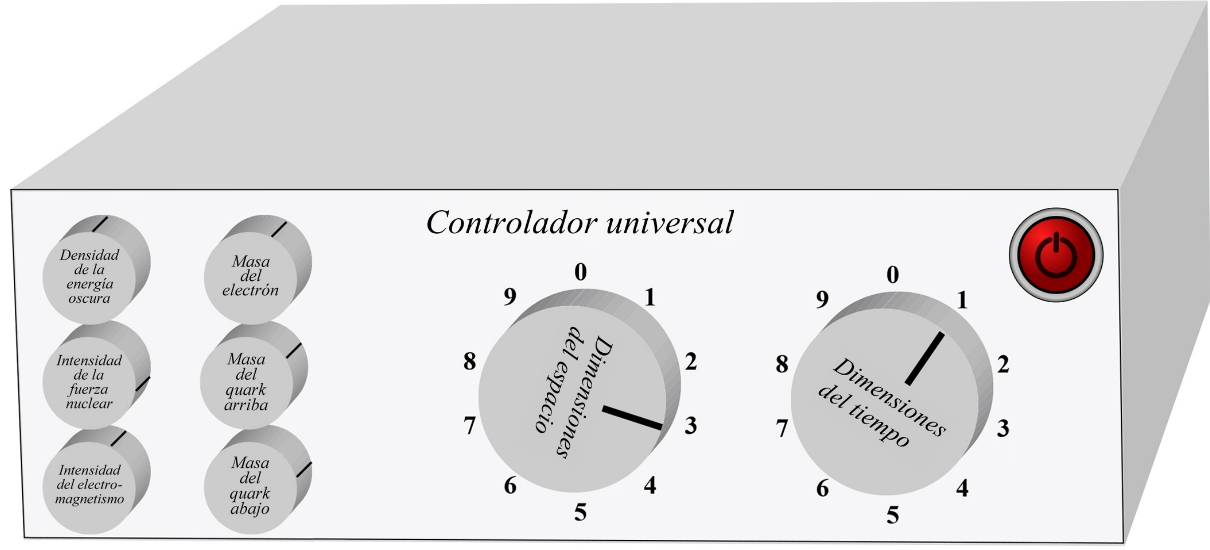


Figura 6.6: El propio tejido del espacio y el tiempo parece traer de serie diversos botones que pueden adoptar distintas posiciones en diferentes partes del multiverso de nivel II. Nuestro universo actual parece tener 32 botones que admiten un ajuste continuo, tal como veremos en el capítulo 10, aparte de

otros mandos adicionales con una cantidad distinta de posiciones para controlar el tipo de partículas que pueden darse en él.

En el instituto de secundaria me enseñaron erróneamente que esas leyes y constantes tienen una vigencia universal, que nunca cambian ni de un lugar a otro ni de un tiempo a otro. ¿A qué se debe este error? Pues a que se necesita una cantidad enorme de energía (mucha más de la disponible) para cambiar la posición de los botones, igual que con la palanca de cambios del coche, así que no nos dábamos cuenta de que pueden modificarse, ni de que tuvieran varias posiciones posibles: a diferencia de las palancas de cambios, los botones de la naturaleza están muy bien ocultos. Se manifiestan en forma de lo que llamamos *campos de alta masa* y otras entidades oscuras, y se necesita una energía inmensa no ya para modificarlos, sino incluso para, antes que nada, detectar si existen.

Entonces ¿cómo averiguaron los físicos que probablemente existen esos botones y que si dispusiéramos de energía suficiente podríamos hacer que el universo funcionara de un modo distinto? Pues de la misma manera que la curiosidad le permitiría a usted descubrir que el coche, en principio, puede funcionar hacia atrás: ¡mediante el estudio detenido del funcionamiento de sus partes! Lo vería examinando a conciencia los engranajes de la transmisión. Del mismo modo, el meticuloso estudio de los elementos esenciales más pequeños de la naturaleza nos sugiere que con la energía suficiente podrían reordenarse de manera que este universo funcionara de forma diferente. Analizaremos el funcionamiento de estos elementos esenciales en el próximo capítulo. La inflación eterna habría aportado la energía necesaria para que las fluctuaciones cuánticas realizaran todas esas reordenaciones posibles en distintos multiversos del nivel I, y se podría comportar como un forzudo gorila que trasteara al azar con todos los botones y palancas dentro de un aparcamiento repleto de coches: al acabar, algunos de esos coches tendrían activada la marcha atrás.

En resumen, el multiverso del nivel II altera de manera radical el concepto que tenemos de las leyes físicas. Muchas de las regularidades que solíamos explicar como *leyes fundamentales*, que por definición se mantienen en cualquier tiempo y lugar, han resultado ser meras *leyes efectivas*, subleyes locales que pueden variar de un lugar a otro y que se corresponden con distintas posiciones de los botones que definen el espacio en distintos estados o fases. La tabla 6.1 resume estas nociones y la relación que mantienen con universos paralelos. Este cambio continúa una antigua tendencia: mientras que Copérnico contempló como ley fundamental el hecho de que los planetas

orbitaran siguiendo circunferencias perfectas, ahora sabemos que también se dan órbitas más generales, y que el grado en que una órbita se aparta de la circularidad (lo que en astronomía se denomina «excentricidad») es en realidad un botón que solo puede cambiar de posición despacio y con dificultad una vez que se ha formado un sistema planetario. El multiverso del nivel II traslada este concepto a un contexto nuevo al degradar muchas más leyes fundamentales a leyes efectivas, tal como veremos a continuación.

El ajuste fino como indicio del multiverso del nivel II

Entonces, ¿existe de verdad el multiverso del nivel II? Como hemos dicho, los signos de la inflación eterna (y hay muchos) son indicios de la existencia del multiverso del nivel II, porque la primera predice este último. También hemos visto que si hay leyes o constantes de la naturaleza que en principio pueden variar de un lugar a otro, la inflación eterna hará que les ocurra lo mismo dentro del multiverso del nivel II. Pero ¿hay alguna otra señal directa que no dependa tanto de argumentos teóricos?

Terminología usada en este libro en relación con el multiverso	
Realidad física	Todo lo que existe; el capítulo 12 sostiene que se corresponde con el multiverso del nivel IV
Espacio	Parte de la realidad física que está continuamente conectada con lo que podemos observar; con la inflación eterna esto se corresponde con el multiverso del nivel II
Este universo	Parte de la realidad física que en principio podemos observar; dejando al margen las complicaciones cuánticas, se trata de la región esférica del espacio desde donde la luz ha tenido tiempo de alcanzarnos durante los catorce mil millones de años transcurridos desde nuestra Gran Explosión
Universo paralelo	Parte de la realidad física que en principio se podría observar desde algún otro sitio, pero no desde aquí. Los universos paralelos no son una teoría, sino una predicción de ciertas teorías
Multiverso	Un conjunto de universos
Multiverso del nivel I	Regiones distantes del espacio no observables por el momento, pero no para siempre; cuentan con las mismas leyes efectivas de la física pero pueden tener historias distintas
Multiverso del nivel II	Regiones distantes del espacio que nunca serán observables porque el espacio intermedio entre esto y aquello sigue inflándose; obedecen las mismas leyes fundamentales de la física, pero sus leyes efectivas de la física pueden diferir
Multiverso del nivel III	Diferentes partes del espacio cuántico de Hilbert (capítulo 8); idéntica diversidad que el del nivel II
Multiverso del nivel IV	Todas las estructuras matemáticas (capítulo 12), correspondientes a distintas leyes fundamentales de la física
Leyes fundamentales	Las ecuaciones matemáticas por las que se rige la física

Leyes efectivas	Soluciones particulares de las ecuaciones matemáticas que describen la física; se pueden confundir con leyes fundamentales si la misma solución se aplica a todo el universo
Ajuste fino	Constantes físicas dentro de las leyes efectivas cuyos valores caen dentro de una franja muy estrecha que permite la vida; el ajuste fino observado se puede esgrimir como indicio del multiverso del nivel II

Tabla 6.1: Guía de los principales conceptos sobre el multiverso y sus interrelaciones.

Pues sí, y a continuación explicaré por qué: el hecho de que este universo manifieste un ajuste fino tan preciso para permitir la vida. Básicamente hemos descubierto que muchos de esos botones de los que hemos hablado están ajustados con valores muy especiales, y si pudiéramos cambiarlos siquiera mínimamente, la vida tal como la conocemos se tornaría imposible. Gire el mando de la energía oscura, y las galaxias no se formarán jamás; mueva otro botón, y los átomos se volverán inestables; y así sucesivamente. Como no he seguido ningún entrenamiento para pilotar un aeroplano, me aterraría enredar con los mandos en la cabina de un avión, pero si pudiera trastear al azar con los mandos de este universo, mis posibilidades de supervivencia se reducirían aún más.

He conocido tres reacciones ante esta precisión observada en el ajuste fino de los mandos:

Casualidad: se trata de una coincidencia casual y no hay nada más.
Diseño: es una señal de que nuestro universo fue diseñado por alguna entidad (quizá una deidad o una forma de vida avanzada que simula un universo) que ajustó los mandos con precisión para que se diera la vida.
Multiverso: es un signo de que existe el multiverso del nivel II, porque si los mandos ocupan todas las configuraciones en algún lugar, es natural que existamos y que nos encontremos en una región habitable.

Pues bien, exploraremos las interpretaciones atribuidas a la casualidad y al multiverso a continuación, y la interpretación de la simulación en el capítulo 12. Pero antes, conozcamos los indicios que tenemos de ese ajuste fino para saber de qué va todo este jaleo.

Ajuste fino de la energía oscura

Tal como vimos en el capítulo 4, nuestra historia cósmica ha consistido en un tira y afloja gravitatorio entre la materia oscura, que tiende a unir las cosas entre sí, y la energía oscura, que tiende a separarlas. Como los procesos que

forman galaxias consisten por entero en la unión de cosas, considero la materia oscura como una aliada, y la energía oscura como una enemiga. La densidad cósmica viene dominada por lo común por la materia oscura, y su amable atracción gravitatoria contribuyó a ensamblar galaxias como la nuestra. Sin embargo, como la expansión cósmica acabó diluyendo la materia oscura, pero no la energía oscura, la incómoda repulsión gravitatoria de la energía oscura consiguió prevalecer y saboteó la formación de más galaxias. Esto significa que si la energía oscura hubiera tenido una densidad considerablemente mayor, habría empezado a prevalecer mucho antes, cuando ninguna galaxia había tenido tiempo aún de formarse. El resultado habría sido un universo mortinato, para siempre oscuro y carente de vida formado por nada más complejo o interesante que gas casi uniforme. Por otro lado, si se redujera lo bastante la densidad de la energía oscura como para volverse considerablemente negativa (algo que la teoría de la gravitación de Einstein permite), nuestro universo habría dejado de expandirse y habría vuelto a compactarse en un episodio cataclísmico de Gran Implosión antes de que cualquier forma de vida hubiera tenido tiempo de desarrollarse. En resumen, si descubriera usted cómo hacer para alterar la densidad de la energía oscura tocando la palanca de la energía oscura de la figura 6.6, por favor, no la desplace demasiado en ninguna de las dos direcciones posibles, porque sería tan desastroso para la vida como pulsar el botón de *Off*.

¿Cuánto se podría girar la rueda de la energía oscura antes de llegar al instante ¡huy!? La posición actual del mando, la que corresponde a la densidad de la energía oscura que ya hemos medido, se sitúa en torno a los 10^{-27} kilogramos por metro cúbico, una cantidad casi ridícula por su cercanía al cero en comparación con el rango disponible: el valor natural máximo para este mando es de una densidad de la energía oscura en torno a 10^{97} kilogramos por metro cúbico, que es cuando las fluctuaciones cuánticas llenan el espacio de agujeros negros diminutos, mientras que el valor mínimo se corresponde con ese mismo número pero precedido de un signo negativo. Un giro completo del mando de la energía oscura que aparece en la figura 6.6 alteraría la densidad en toda su amplitud, ya que la posición actual del mando en nuestro universo dista alrededor de una fracción 10^{-123} de una vuelta de la posición intermedia. Esto significa que si quisiéramos ajustar el mando para permitir la formación de galaxias, habría que medir el ángulo del tramo que habría que mover la rueda hacia la derecha ¡con más de 120 decimales! Aunque parece un ajuste de una precisión imposible, da la impresión de que algún mecanismo logró hacerlo en nuestro universo.

Ajuste fino de las partículas

En el próximo capítulo exploraremos el micromundo de las partículas elementales. También en él hay muchos botones que determinan la masa de las partículas y la intensidad con que interaccionan unas partículas con otras, y la comunidad científica ha ido descubriendo de manera gradual que muchos de esos mandos también están ajustados con precisión.

Por ejemplo, si la fuerza electromagnética se debilitara tan solo un 4 %, el Sol estallaría al instante, porque el hidrógeno que contiene se fusionaría en lo que llamamos *diprotones*, una clase de helio carente de neutrones de otro modo inexistente. Si experimentara una intensificación significativa, los átomos que antes eran estables, como el carbono y el oxígeno, sufrirían una desintegración radiactiva.

Si la denominada fuerza nuclear débil fuera bastante más ligera, no habría hidrógeno, porque todo él se habría convertido en helio poco después de nuestra Gran Explosión. Si fuera mucho más intensa o mucho más débil, los neutrinos generados por las explosiones de supernova no harían saltar en pedazos las regiones exteriores de esas estrellas, y es poco probable que los elementos más pesados necesarios para la vida, como el hierro, lograran salir alguna vez de las estrellas donde se formaron y acabaran en planetas como la Tierra.

Si los electrones fueran mucho más ligeros, no habría estrellas estables, y si fueran mucho más pesados, no existirían estructuras ordenadas como los cristales y las moléculas de ADN. Si los protones fueran un 0,2 % más pesados, se desintegrarían en neutrones incapaces de retener electrones, así que no habría átomos. Si, por el contrario, fueran mucho más ligeros, los neutrones situados en el interior de los átomos se desintegrarían en protones, así que no habría átomos estables salvo el hidrógeno. De hecho, la masa del protón depende de otro botón que tiene un rango de variación muy amplio y que debe ajustarse con una precisión de treinta y tres decimales para lograr algún átomo estable además del hidrógeno.

Ajuste fino cosmológico

Muchos de estos ejemplos de ajuste fino fueron descubiertos en los años setenta y ochenta del siglo pasado por Paul Davies, Brandon Carter, Bernard Carr, Martin Rees, John Barrow, Frank Tipler, Steven Weinberg y otros físicos. Y no han dejado de aparecer ejemplos nuevos. Realicé mi primera incursión en este mundo junto a Martin Rees, un astrónomo de pelo blanco e

impecables modales británicos que es uno de mis héroes científicos. No he visto a nadie disfrutar y emocionarse tanto dando una charla y, además, es como si lanzara rayos de entusiasmo por los ojos. Él fue el primer científico que me animó a guiarme por el instinto y a perseguir temas no convencionales. En el capítulo anterior vimos que la amplitud de las fluctuaciones cósmicas primordiales rondaba el 0,002 %. Martin y yo calculamos que si fuera mucho menor, no se habrían formado galaxias, y si fuera mucho mayor, habrían ocurrido impactos frecuentes de asteroides y otros inconvenientes.

Sobre esto hablaba yo cuando dormí a Alan Guth. Sin embargo, mi anfitrión, Aleks Vilenkin, permaneció despierto, y más tarde formamos equipo para estudiar los neutrinos, partículas fantasmagóricas generadas en abundancia por nuestra Gran Explosión. Descubrimos que también ellas parecían manifestar un ajuste fino, ya que si fueran mucho más pesadas sabotearían la formación de galaxias. A mi compañero del MIT Frank Wilczek se le ocurrió una manera de que la densidad de la materia oscura pueda variar de un universo a otro y, junto a Martin Rees y mi amigo Anthony Aguirre, calculamos que si el mando de la materia oscura se ajustara en una posición muy alejada del valor observado, también tendría consecuencias negativas para nuestra salud.

La explicación de la casualidad

Entonces, ¿cómo hay que entender estos ajustes precisos? En primer lugar ¿por qué no los ignoramos por completo por tratarse de un montón de casualidades fortuitas? Pues porque el método científico no tolera coincidencias inexplicables: decir «mi teoría necesita una coincidencia inexplicable para concordar con la observación» equivale a decir «mi teoría está descartada». Por ejemplo, hemos visto que la inflación predice que el espacio es plano, y las manchas del fondo cósmico de microondas deberían tener un tamaño medio aproximado de un grado, y hemos visto que los experimentos descritos en el capítulo 4 así lo confirmaron. Supongamos que los miembros del equipo del *Planck* hubieran observado un tamaño medio de manchas mucho menor que los animara a anunciar que habían descartado la inflación con un 99,999 % de fiabilidad. También cabría considerar que fluctuaciones aleatorias en un universo plano *podrían* haber causado la aparición de las manchas inusualmente pequeñas que habían medido, y que eso los llevó hacia una conclusión incorrecta, pero hay un 99,999 % de probabilidades de que no fuera eso lo que pasó. En otras palabras, la inflación

necesitaría una coincidencia inexplicable que solo se da 1 vez entre 100 000 para concordar con las mediciones. Alan Guth y Andréi Linde se habrían saltado el método científico si en ese contexto hubieran celebrado una rueda de prensa conjunta para insistir en que no había ningún indicio contrario a la inflación porque tenían el presentimiento de que las mediciones del *Planck* no eran más que una coincidencia fortuita que debía ignorarse.

Dicho de otro modo, las fluctuaciones aleatorias implican que en ciencia nunca podremos estar seguros de nada al 100 %, porque siempre cabe una probabilidad minúscula de que haya ruido aleatorio en las medidas, de que el detector funcione mal o incluso de que todo el experimento no sea más que una alucinación. En la práctica, en cambio, la comunidad científica suele considerar más que muertas las teorías que se descartan con un 99,999 % de seguridad. Aun así, la teoría de que el ajuste fino de la energía oscura se debe a una carambola obliga a creer en una casualidad inexplicable mucho más inverosímil aún, y que, por tanto, se descarta con un 99,999999… por ciento de fiabilidad, con 120 nueves después de la marca decimal.

La palabra con A

¿Y qué hay de la explicación del ajuste preciso mediante el multiverso del nivel II? Una teoría donde los botones de la naturaleza adoptan todos los valores posibles en algún lugar pronosticará con un 100 % de fiabilidad que existe un universo habitable como el nuestro, y como solo podemos vivir en un universo habitable, no debería sorprendernos que estemos en uno así.

Aunque esta explicación es lógica, levanta bastante controversia. Después de todos los ridículos intentos acometidos a lo largo de la historia por mantener la Tierra en el centro de nuestro universo, ha arraigado con fuerza el planteamiento opuesto. Lo que se conoce como el principio copernicano sostiene que el lugar que ocupamos en el espacio y en el tiempo no tiene nada de especial. Brandon Cárter propuso un competidor directo que denominó *principio antrópico débil*. «Debemos estar preparados para aceptar que nuestra ubicación dentro del universo es necesariamente privilegiada en tanto en cuanto es compatible con nuestra existencia como observadores». Algunos de mis colegas interpretaron esto como un paso atrás inadmisible con reminiscencias del geocentrismo. Cuando se tiene en cuenta la precisión comentada de los ajustes finos, la idea del multiverso del nivel II infringe enormemente el principio copernicano, tal como ilustra la figura 6.7: la inmensa mayoría de universos es inerte como piedras, y el nuestro es anómalo en extremo: contiene mucha menos energía oscura que la mayor parte de los

restantes, y también tiene muchos otros «mandos» ajustados de forma muy inusual.

La explicación de cosas que se pueden observar mediante la introducción de universos paralelos que no se pueden observar también enerva a algunos de mis colegas. Recuerdo una conferencia que se celebró en 1998 en Fermilab, donde reside el famoso acelerador de partículas a las afueras de Chicago, en la que el público soltó una estruendosa pitada cuando el ponente mencionó la «palabra con *A*», *antrópico*. De hecho, para eludir el radar y superar el arbitraje, Martin Rees y yo hicimos todo lo posible para evitar usar la palabra con *A* en el resumen de aquel primer artículo antrópico que escribimos juntos…

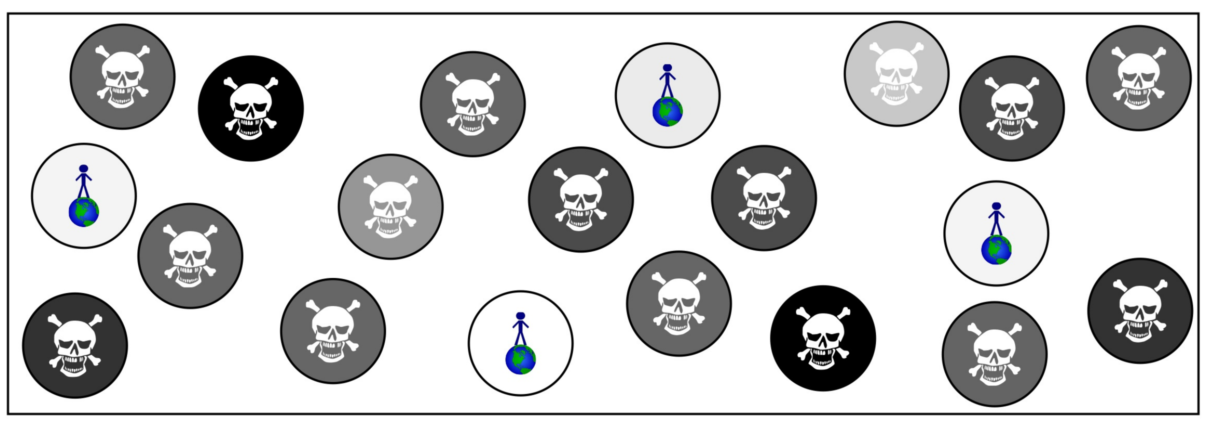


Figura 6.7: Si la densidad de la energía oscura (representada aquí por la oscuridad del sombreado) varía de un universo a otro, las galaxias, los planetas y la vida solo surgirán en esos universos donde sea más baja. En esta ilustración, la fracción habitable (menos oscura) se corresponde con el 20 % de los universos, pero la fracción real podría acercarse más a 10^{-120}.

La única objeción que pongo al principio antrópico de Cárter es que contenga el término *principio*, lo que induce a pensar que se trata de algo en cierto modo opcional. Pero no, el empleo de la lógica correcta al enfrentar una teoría a la observación no es opcional. Si la mayoría del espacio no es habitable, está claro que debemos contar con que nos encontramos en un lugar especial por ser habitable. De hecho, la mayoría del espacio parece bastante inhabitable incluso limitándonos a nuestro propio universo: ¡buena suerte si espera sobrevivir en el vacío intergaláctico o dentro de una estrella! Por ejemplo, solo la milésima parte de una billonésima de una billonésima de una billonésima de nuestro universo reside un kilómetro a la redonda de una superficie planetaria, así que esos son lugares muy especiales, pero ahí es donde nos encontramos, y no tiene nada de raro.

Consideremos un ejemplo más interesante: el de *M*, la masa del Sol. *M* repercute en la luminosidad del Sol y, recurriendo a la física elemental,

podemos calcular que la vida tal como la conocemos en la Tierra solo es posible si M se sitúa dentro de la estrecha franja de $1{,}6 \times 10^{30}$ kg y $2{,}4 \times 10^{30}$ kg, porque en cualquier otro caso el clima de la Tierra sería más frío que en Marte o más tórrido que en Venus. El valor que hemos medido es $M \sim 2{,}0 \times 10^{30}$ kg. Esta coincidencia aparentemente inexplicable entre el valor habitable y el observado tal vez resulte desconcertante, dado que los cálculos revelan que puede haber estrellas con un rango de masas mucho más amplio que ese y que va desde $M \sim 10^{29}$ kg a 10^{32} kg: la masa del Sol parece ajustada con precisión para la vida. Sin embargo, esta casualidad aparente se puede explicar porque hay un conjunto de muchos de esos sistemas con distintas «posiciones de los mandos»: ahora sabemos que existen muchos sistemas así con variedad de tamaños en la estrella central y las órbitas planetarias y, obviamente, debemos contar con encontrarnos en uno de los sistemas habitables.

El detalle interesante aquí es que podríamos habernos basado en este ajuste fino del Sistema Solar para afirmar que existen sistemas solares diferentes, antes incluso de descubrirlos. Siguiendo una lógica idéntica, podemos basarnos en los ajustes finos de nuestro universo para defender la existencia de universos distintos. La única diferencia en este caso estriba en si las otras entidades predichas son observables o no, pero esta disparidad no debilita el argumento, porque no afecta a la lógica subyacente.

¿Qué podemos aspirar a predecir?

A los físicos nos gusta medir números. Como, por ejemplo, estos:

Parámetro	**Valor observado**
Masa de la Tierra	$5{,}9742 \times 10^{24}$ kg
Masa del electrón	$9{,}10938188 \times 10^{-31}$ kg
Radio de la órbita de la Tierra dentro del Sistema Solar	149 597 870 691 m
Radio de la órbita del electrón en el átomo de hidrógeno	$5{,}29177211 \times 10^{-11}$ m

También nos encanta predecir esos valores a partir de principios fundamentales. Pero ¿lo conseguiremos algún día, o es una mera ilusión? Antes de lograr el célebre descubrimiento de que las órbitas planetarias son elípticas, Johannes Kepler ideó una teoría elegante en relación con el tercer número de la tabla anterior: planteó que las órbitas de Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno mantenían entre sí las mismas proporciones que seis esferas anidadas unas dentro de otras, como muñecas rusas,

separadas respectivamente entre sí por un octaedro, un icosaedro, un dodecaedro, un tetraedro y un cubo (véase la figura 7.2 de la página 159). Aparte de que mejores medidas no tardaron en descartar su teoría, toda aquella suposición nos parece absurda ahora que sabemos que hay otros sistemas solares: las órbitas específicas que hemos medido dentro del Sistema Solar no revelan nada fundamental sobre este universo, sino tan solo algo sobre el lugar que ocupamos dentro de él; en concreto, en qué sistema solar particular residimos. Según esto, podemos considerar esas cifras como parte de nuestra dirección dentro del espacio, como parte de nuestro código postal cósmico. Por ejemplo, si hubiera que explicar a un cartero extraterrestre en qué sistema planetario del entorno galáctico tendría que entregar un paquete, le diríamos que se dirigiera al formado por ocho planetas cuyas órbitas son 1,84, 2,51, 4,33, 12,7, 24,7, 51,1 y 76,5 veces mayores que la del planeta más interior. Y entonces respondería: «¡Ah, sí! ¡Ya sé de qué sistema solar me habla!». De la misma manera, siempre hemos renunciado a predecir la masa o el radio de la Tierra a partir de principios fundamentales, porque sabemos que existen muchos planetas de tamaños distintos.

Pero ¿qué hay de la masa y el tamaño orbital de un electrón? Estos valores son idénticos en todos los electrones que hemos medido dentro de este universo y eso nos ha infundido la esperanza de que sean propiedades realmente fundamentales de nuestro mundo físico, cantidades que algún día llegaremos a calcular únicamente a partir de la teoría, siguiendo el mismo espíritu del modelo de las órbitas de Kepler. De hecho, en el año 1997, el conocido experto en teoría de cuerdas Ed Witten me comunicó su confianza en que la teoría de cuerdas predijera algún día cuántas veces es más ligero un electrón que un protón. Sin embargo, la última vez que lo vi, en la fiesta del sexagésimo cumpleaños de Andréi Linde, me confesó después de tomar un poco de vino que había renunciado a predecir algún día todas las constantes de la naturaleza.

¿A qué viene este nuevo pesimismo? Pues a que la historia se está repitiendo. El multiverso del nivel II ejerce sobre la masa del electrón el mismo efecto que tiene la masa de otros planetas en la masa de la Tierra, lo degrada de ser una propiedad fundamental de la naturaleza a convertirse en un mero detalle de nuestra dirección cósmica. Lo mismo ocurre con cualquier número que varíe de un miembro a otro del multiverso del nivel II: la medida de su valor se limita a estrechar las opciones acerca de en qué universo concreto nos encontramos.

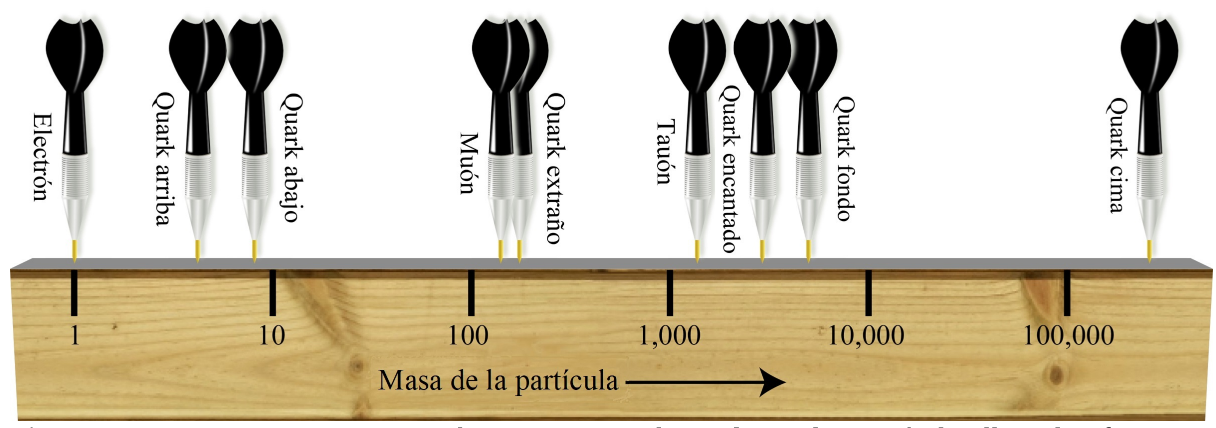


Figura 6.8: Las nueve masas que hemos conseguido medir en las partículas llamadas *fermiones* parecen bastante aleatorias, tal como predicen algunos modelos de multiverso, lo que sugiere que nunca lograremos calcularlas a partir de principios fundamentales. La escala ilustra cuántas veces es más pesada cada partícula que un electrón.

Como veremos en el capítulo 10, hasta ahora hemos descubierto 32 números independientes integrados en este universo y que intentamos medir con la mayor cantidad posible de cifras decimales. ¿Sufren variaciones dentro del multiverso del nivel II, o se puede calcular alguno de ellos a partir de principios fundamentales (o a partir de alguna otra lista más reducida de números)? Aún no disponemos de una teoría física fundamental que nos permita responder esta pregunta, así que, hasta entonces, será interesante estudiar las medidas obtenidas en busca de pistas. Los números que varían dentro del multiverso deberían parecemos aleatorios si viviéramos en un universo aleatorio. ¿Tienen pinta de aleatorios los valores medidos? Bueno, que cada cual juzgue por sí mismo a partir de la figura 6.8, donde he representado la masa de nueve partículas fundamentales llamadas *fermiones* en física de partículas. Dejando al margen la curiosa escala que he utilizado, donde la masa se multiplica por 10 cada pocos centímetros hacia la derecha, a mí me parecen nueve dardos lanzados al azar. De hecho, esos nueve números han superado con brillantez varias pruebas estadísticas estrictas de aleatoriedad compatibles con un surgimiento aleatorio a partir de lo que en estadística se denomina distribución uniforme con una pendiente inferior al 10 %.

No todo está perdido

Si viviéramos en un universo aleatorio *habitable*, los números deberían seguir pareciendo aleatorios, pero con una distribución de probabilidad que favoreciera la habitabilidad. Combinando predicciones sobre cómo varían los números en el multiverso con la física relacionada con la formación de

galaxias, etc., podemos emitir predicciones estadísticas de qué deberíamos observar en realidad, y tales predicciones han concordado bastante bien hasta ahora con los datos de la energía oscura, la materia oscura y los neutrinos (figura 6.9). De hecho, la primera predicción de Steven Weinberg de densidad no nula para la energía oscura se realizó de este modo.

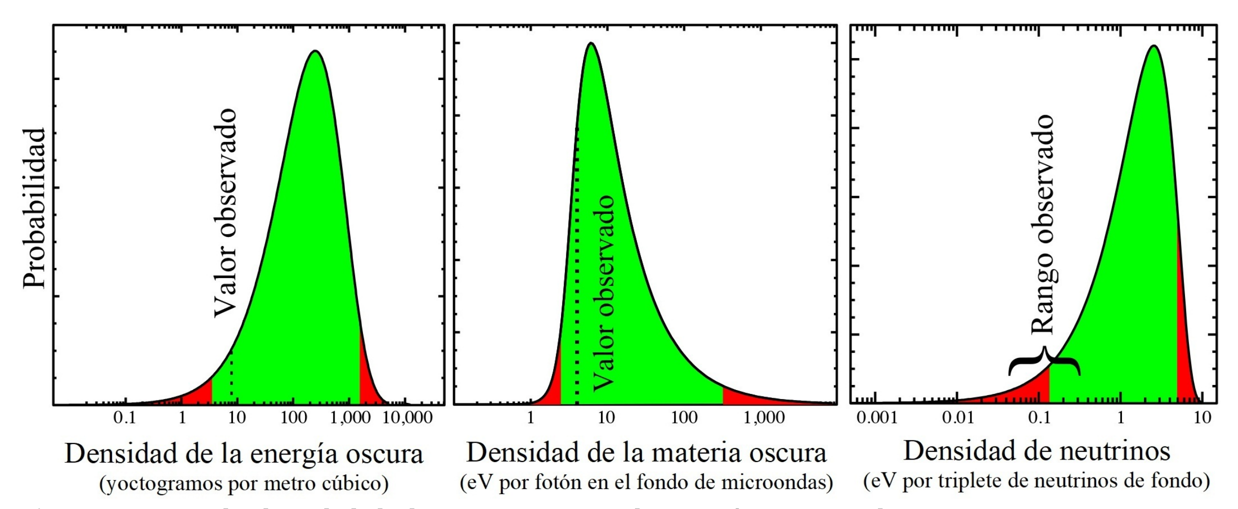


Figura 6.9: Si la densidad de la materia oscura, la energía oscura y los neutrinos experimentaran variaciones sustanciales dentro del conjunto del multiverso del nivel II, la mayoría de los universos estarían desprovistos de galaxias y de vida, y un observador elegido al azar debería contar con medir valores dentro de un rango bastante estrecho, cuantificado por las distribuciones de probabilidad mostradas. Deberíamos esperar que los valores medidos cayeran en la región gris central con un 90 % de probabilidades y, de hecho, lo hacen.

Ha sido divertido recorrer toda la lista de los «botones» conocidos de nuestro «controlador universal», y ver qué ocurriría si estuvieran en posiciones diferentes. Por ejemplo, por favor no gire los botones de la figura 6.6 para el número de dimensiones espaciales y temporales, porque sería letal. Si aumentara la cantidad de dimensiones espaciales a más de tres no habría sistemas planetarios estables, ni átomos estables. Por ejemplo, pasar a un espacio tetradimensional altera la ley del inverso de los cuadrados de Newton para la fuerza gravitatoria y la convierte en una ley del inverso de los cubos, lo cual no proporciona ni una sola órbita estable. Me emocioné mucho cuando descubrí esto, y más tarde reparé en que había batido mi récord de innovación personal: el físico austríaco Paul Ehrenfest ya lo había descubierto en 1917… Los espacios con menos de tres dimensiones no admiten sistemas solares porque la gravedad deja de ejercer atracción, y probablemente sean demasiado simples para contener observadores también por otras razones, como que dos neuronas no pueden cruzarse. La modificación del número de dimensiones temporales no es tan absurda como podría pensarse, y la teoría de la relatividad general de Einstein se maneja bien con ella. Sin embargo,

una vez escribí un artículo mostrando que eso eliminaría la propiedad matemática clave de la física que nos permite realizar predicciones, lo que restaría todo el sentido al desarrollo del cerebro. Tal como ilustra la figura 6.10, esto convierte el espacio de tres dimensiones y el tiempo de una dimensión en la única opción viable. En otras palabras, un recién nacido con una inteligencia infinita podría, antes de realizar ninguna observación en absoluto, calcular a partir de principios fundamentales que hay un multiverso de nivel II que contiene las distintas combinaciones de dimensiones espaciales y temporales, y que 3 + 1 es la única opción para que se dé la vida. Por tanto, parafraseando a Descartes, esa criatura podría pensar *Cogito, ergo tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal*, antes de abrir los ojos por primera vez y comprobar su conclusión.

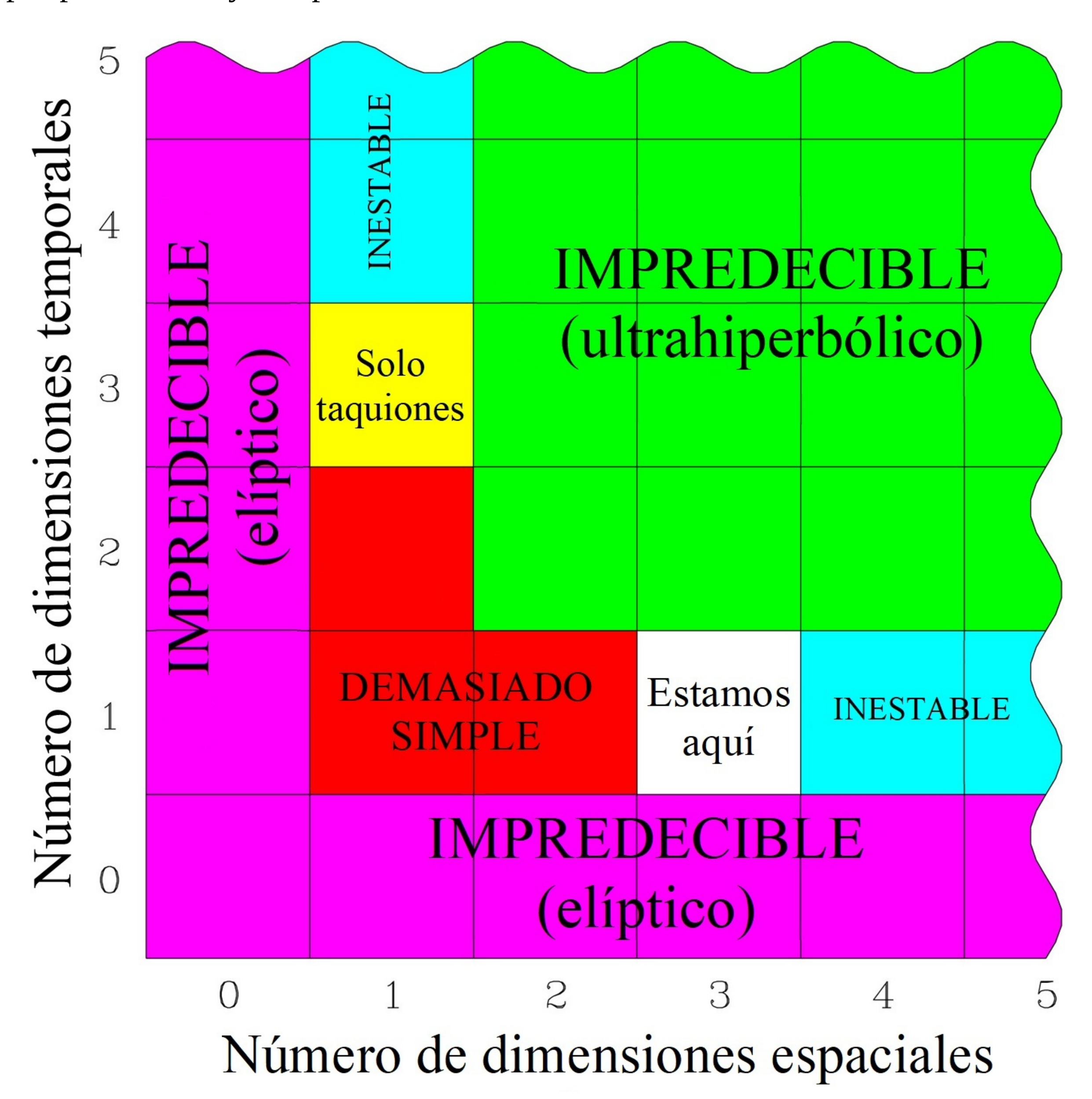


Figura 6.10: Con más de tres dimensiones espaciales no hay átomos ni sistemas solares estables. Con menos, no hay atracción gravitatoria. Con más o menos de una dimensión temporal, la física pierde toda su capacidad predictiva, y el desarrollo cerebral no tendría ningún sentido. En un multiverso del nivel II donde la cantidad de dimensiones espaciales y temporales varíe de un universo a otro, deberíamos contar con residir en un universo con tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal, porque lo más probable es que todos los demás universos estén deshabitados.

Si todo el multiverso del nivel II existe en un solo espacio, ¿cómo podría albergar distintas dimensionalidades? Bueno, de acuerdo con los modelos más consolidados de la teoría de cuerdas, lo único que varía es la dimensionalidad *aparente*, el espacio real siempre tiene nueve dimensiones, pero no percibimos seis de ellas porque están microscópicamente enroscadas como en el cilindro de la figura 2.7: si recorremos una distancia minúscula a lo largo de una de esas seis dimensiones ocultas, regresaremos al punto de partida. Se supone que en un principio las nueve dimensiones estaban enroscadas, pero que en nuestra mancha de espacio la inflación estiró tres de ellas hasta darles unas dimensiones astronómicas, mientras que dejó seis de ellas diminutas e invisibles. En otro lugar del multiverso del nivel II la inflación podría haber estirado una cantidad diferente de dimensiones y haber creado así mundos desde cerodimensionales hasta nonadimensionales.

La comunidad matemática ha identificado muchas formas distintas en las que esas dimensiones adicionales pueden enroscarse y llenarse de energía (por ejemplo, es posible que campos magnéticos generalizados serpenteen por el interior de las dimensiones ocultas), y en teoría de cuerdas, todas estas opciones se corresponden con las distintas posiciones de los mandos que exploramos con anterioridad. Es posible que cada opción equivalga no solo a diferentes constantes físicas en las dimensiones que no están enroscadas, sino también a diferentes reglas para la existencia de partículas elementales y las ecuaciones efectivas que las describen. Podría haber universos paralelos del nivel II donde haya, por decir algo, 10 tipos de quarks en lugar de 6.

En resumen, esto significa que aunque las ecuaciones *fundamentales* de la física (tal vez las de la teoría de cuerdas) sigan siendo válidas en todo el multiverso del nivel II, las leyes *aparentes* de la física que descubran los observadores pueden variar de un multiverso del nivel I a otro. En otras palabras, esas leyes aparentes son universales, no en el sentido de «siempre aplicables» que les atribuye el diccionario, sino tan solo en el sentido más literal de «aplicables únicamente en este universo». Solo son *multiversales* en el nivel I, no en el nivel II. En cambio, las ecuaciones fundamentales son multiversales incluso en el nivel II: no cambiarán hasta que lleguemos al capítulo 12 y al multiverso del nivel IV…

Intermedio recapitulatorio multiversal

En este capítulo hemos indagado en multitud de ideas que suenan extrañas a nuestros oídos, así que propongo acabarlo dando un paso atrás para considerar una panorámica del cuadro completo. Creo que la inflación es la explicación que no cesa (ni de inflarse ni de explicar). Del mismo modo que la división celular no da lugar únicamente a un individuo y se para, sino a una población inmensa y variada de seres humanos, da la impresión de que la inflación tampoco creó únicamente un universo y paró, sino que dio lugar a una población inmensa y variada de universos paralelos, creando tal vez todas las opciones posibles de lo que solíamos considerar constantes físicas. Pero esto explicaría a su vez otro misterio: el hecho de que este universo esté ajustado con tanta precisión para la vida. Aunque la mayoría de los universos paralelos creados por la inflación hayan nacido inertes, habrá algunos con unas condiciones perfectas para la vida, y no es de extrañar que nos hallemos en uno así.

A mi compañero Eddie Farhi le gusta hablar de Alan Guth como el «posibilitador», porque la inflación eterna permite que ocurra todo lo que puede ocurrir: la inflación produce el espacio necesario para que eso suceda y crea las condiciones iniciales necesarias para que se desarrolle esa historia. En otras palabras, la inflación es un proceso que convierte lo potencial en real.

Si le incomoda hablar del multiverso del nivel II, diga «el espacio» en su lugar, porque recordemos que todos los universos paralelos del nivel I y del nivel II no son más que regiones distantes de un mismo espacio infinito, solo que con una estructura mucho más rica que la que imaginó Euclides: se está expandiendo, solo alcanzamos a ver de él la pequeña parte que llamamos *nuestro universo*, y sus propiedades lejanas son más diversas que las que apreciamos a través de los telescopios. La concepción del capítulo *3* de que nuestro universo es homogéneo y se revela igual en todas partes no es más que un interludio válido únicamente a escalas intermedias: la gravitación concentra las cosas y las vuelve interesantes a escalas pequeñas, mientras que la inflación diversifica las cosas y las torna interesantes a gran escala.

Si aún le cuesta alcanzar la paz interior con los universos paralelos, hay otra manera de concebirlos que tal vez le sea de ayuda. Alan Guth la comentó durante una charla reciente en el MIT, pero no tiene nada que ver con la inflación. El procedimiento científico que debemos seguir cuando descubrimos un objeto en la naturaleza es buscar el mecanismo que lo creó.

Los coches salen de las fábricas de coches, los conejos surgen de sus progenitores conejos, y los sistemas solares se crean a partir del colapso gravitatorio en nubes moleculares gigantes. Así que es bastante razonable suponer que nuestro universo fue creado por alguna clase de mecanismo generador de universos (quizá la inflación, quizá algo totalmente distinto). La cosa es que todos los mecanismos que acabamos de mencionar producen de manera natural *muchas* copias de lo que crean; un cosmos en el que hubiera solo un coche, un conejo y un sistema solar resultaría bastante artificioso. Del mismo modo cabe afirmar que es más natural que el mecanismo que realmente creó el universo, fuera el que fuera, produjera muchos universos en lugar de únicamente el que nos cobija a nosotros.

Si aplicamos el mismo argumento al mecanismo que desencadenó la *inflación* y que a la larga dio lugar a nuestro multiverso del nivel II, se concluye que probablemente produjo muchos multiversos separados del nivel II que no mantienen ninguna conexión entre sí. Sin embargo, esta variante se revela imposible de verificar, puesto que ni aportaría mundos cualitativamente diferentes ni alteraría la distribución probabilística de sus propiedades: todos los multiversos posibles del nivel I ya se realizan dentro de cada uno de esos multiversos del nivel II.

Dejando a un lado la inflación, puede que haya otros mecanismos generadores de universos. Una idea propuesta por Richard Tolman y John Wheeler, y desarrollada recientemente por Paul Steinhardt y Neil Turok, es que nuestra historia cósmica es cíclica, que experimenta una sucesión infinita de Grandes Explosiones. En caso de existir, el conjunto de esas encarnaciones también formaría un multiverso, tal vez con una diversidad parecida a la del nivel II.

Otro mecanismo de creación de universos, propuesto por Lee Smolin, guarda relación con la mutación y el brote de universos nuevos a través de agujeros negros, en lugar de mediante inflación. Esto también daría lugar a un multiverso del nivel II, solo que la selección natural favorecería los universos con la máxima producción de agujeros negros. Es posible que mi amigo Andrew Hamilton, de quien hablé en el capítulo 4, haya descubierto ese mecanismo generador de universos: ha investigado una inestabilidad que ocurre dentro de los agujeros negros poco después de su formación, y se trata de un fenómeno tan violento que bastaría para desencadenar la inflación que crearía un multiverso del nivel I, el cual estaría contenido íntegramente dentro del agujero negro original, solo que sus moradores seguramente ni lo sabrían ni les importaría.

Los escenarios de lo que se conoce como *cosmología de branas* admiten la existencia de otro mundo tridimensional literalmente paralelo al nuestro y situado a poca distancia, en una dimensión superior. Sin embargo, no creo que ese mundo (o *brana*) merezca llamarse *universo paralelo* separado del nuestro, puesto que puede establecer interacciones gravitatorias con él igual que hacemos nosotros con la materia oscura.

Los universos paralelos siguen generando gran controversia. Pero a lo largo de la última década se ha producido un cambio notable dentro de la comunidad científica porque los multiversos han pasado de ocupar una posición marginal a debatirse abiertamente en los congresos de física y en artículos revisados por pares. Creo que el éxito de la cosmología de precisión y de la inflación ha sido determinante para traer ese cambio, al igual que el hallazgo de la energía oscura y la imposibilidad de explicar su ajuste fino por otras vías. Hasta esos colegas a los que les disgusta la idea del multiverso suelen reconocer ahora a regañadientes que los argumentos básicos para defenderlo son razonables. La crítica principal ha pasado de ser «esto no tiene ningún sentido y lo detesto» a ser «lo detesto».

Los humanos adolecemos de una tendencia bien documentada hacia la arrogancia que nos induce a creernos con presunción el centro de todo, mientras todo lo demás gira a nuestro alrededor. Poco a poco hemos sabido que en realidad somos nosotros quienes giramos alrededor del Sol, que a su vez gira alrededor de una galaxia como muchísimas otras. Los avances físicos tal vez nos permitan ahondar aún más en la verdadera naturaleza de la realidad; de hecho, en este libro tan solo hemos descendido hasta dos niveles de multiversos, y aún nos quedan dos más por recorrer. En el próximo capítulo empezaremos a explorar el multiverso del nivel III. El precio que habrá que pagar por ello es crecer en humildad (lo que seguramente nos hará bien), pero a cambio quizá nos veamos residiendo en una realidad más grandiosa que la que nuestros ancestros alcanzaron a imaginar en sus sueños más exaltados.

SUMARIO

- Los universos paralelos no son una teoría, sino una predicción de ciertas teorías.
- La inflación eterna predice que nuestro universo (la región esférica del espacio desde la que la luz ha tenido tiempo de llegarnos durante los catorce mil millones de años transcurridos desde nuestra Gran

Explosión) no es más que uno de los infinitos universos del multiverso del nivel I, donde todo lo que puede suceder ocurre en algún lugar.

- Para que una teoría sea científica no es necesario observar y verificar todas sus predicciones, basta con lograrlo al menos con una de ellas. La inflación es la principal teoría de nuestros orígenes cósmicos porque ha superado comprobaciones observacionales, y los universos paralelos parecen ser una parte no opcional de todo el paquete.
- La inflación convierte la potencialidad en realidad: si las ecuaciones matemáticas que gobiernan el espacio uniforme tienen múltiples soluciones, la inflación eterna creará infinitas regiones de espacio representativas de cada una de esas soluciones; este es el multiverso del nivel II.
- Muchas leyes y constantes físicas invariables en un multiverso del nivel I pueden cambiar en el multiverso del nivel II, así que los alumnos de universos paralelos pertenecientes al nivel I estudian lo mismo en la clase de física, pero cosas distintas en la clase de historia, mientras que los alumnos de universos paralelos pertenecientes al nivel II estudiarían contenidos distintos también en la clase de física.
- Esto explicaría por qué muchas constantes de nuestro propio universo están ajustadas con tanta precisión para la aparición de la vida, y que si cambiaran mínimamente ya no sería viable la vida tal como la conocemos.
- Esto aportaría asimismo un significado distinto a muchos números medidos por la física: no dicen nada fundamental sobre la realidad física, sino únicamente revelan algo sobre el lugar que ocupamos dentro de ella y forman parte del código postal cósmico que nos corresponde.
- Aunque esos universos paralelos sigan creando controversia, la crítica principal ha pasado de ser «esto no tiene sentido y lo detesto» a ser «lo detesto».

Segunda parte
PERSPECTIVA MICRO

7
Legos cósmicos

> Todo lo que llamamos realidad consiste en cosas que no se pueden considerar reales.
>
> Niels Bohr

¡No, esto no tiene sentido! ¡Tiene que haber un error en algún sitio! Estoy solo en la habitación de mi novia en la residencia de estudiantes de Estocolmo, preparando mi primer examen de mecánica cuántica en la universidad. El libro de texto dice que las cosas pequeñas, como los átomos, pueden estar en varios sitios a la vez, mientras que las cosas grandes, como la gente, no pueden. *¡No puede ser!* Me digo. *La gente está formada por átomos así que, si los átomos pueden estar en varios sitios a la vez ¡seguro que nosotros también podemos!* Además, en él se afirma que en cuanto una persona observa dónde se encuentra un átomo, este salta aleatoriamente a uno solo de los lugares que ocupaba con anterioridad. Sin embargo, no consigo hallar ninguna ecuación que defina con exactitud qué se supone que es una observación. *¿Valdría un robot como observador? ¿Y un solo átomo? Y el libro acaba de decir que todo sistema cuántico experimenta cambios deterministas de acuerdo con la llamada ecuación de Schrödinger: ¿no hay ahí una contradicción lógica con el asunto de los saltos aleatorios?*

En mi ofuscación me armo de valor para llamar a la puerta de nuestro gran experto, un profesor de física miembro del comité Nobel. Veinte minutos después, salgo de su despacho sintiéndome ridículo y convencido de que en cierto modo entendí mal todo el asunto. Esto marca el comienzo de un largo viaje personal que aún prosigue y que conduce a universos cuánticos paralelos. Hasta un par de años después, cuando me trasladé a Berkeley para cursar mi doctorado, no caí en la cuenta de que no fui yo quien había entendido mal. Con el tiempo supe que aquellos problemas de la mecánica cuántica habían irritado a muchos físicos de renombre y, al final, acabé divirtiéndome mucho con la redacción de mis propios artículos sobre el tema.

Pero, antes de contarle cómo creo ahora que casa todo ello (será en el capítulo 8), quiero que viajemos al pasado para que capte de verdad la locura de la mecánica cuántica y de qué va todo este embrollo.

Legos atómicos

La última vez que le pregunté a mi hijo Alexander qué quería para su cumpleaños, me dijo: «¡Sorpréndeme con lo que quieras, pero que sea algo de Lego…!». A mí también me fascinan los Legos, y creo que a nuestro universo le pasa igual: todo está hecho con los mismos elementos constitutivos esenciales, tal como ilustra la figura 7.1. Me parece admirable que el mismo paquete de Legos cósmicos, formado por los 80 átomos estables de la tabla periódica[25], sirva para construir de todo, desde piedras hasta conejos, desde estrellas hasta equipos de música, donde la única diferencia estriba en cuántos Legos se usan de cada clase y de qué manera se distribuyen.

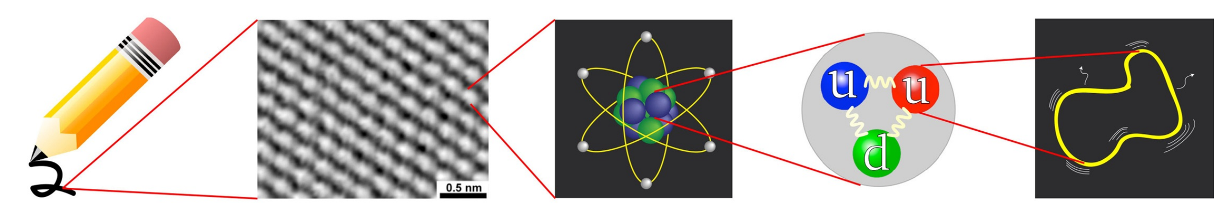


Figura 7.1: La mina de los lápices consiste en grafito, que se compone de capas de átomos de carbono (esta es una imagen real obtenida con un microscopio de efecto túnel), que a su vez están formados por protones, neutrones y electrones. Los protones y los neutrones consisten en quarks arriba y abajo que, a su vez, podrían ser cuerdas en vibración. Los repuestos de mina de lápiz que compré para trabajar en este libro contienen alrededor de 2×10^{21} átomos, así que podríamos cortarlas por la mitad un máximo de 72 veces.

La idea esencial de los Legos a base de elementos constitutivos indivisibles tiene, por supuesto, una historia venerable que se remonta a los griegos, porque el término *átomo* procede de la palabra griega antigua para «indivisible». De hecho, Platón afirmó en su diálogo *Timeo* que los cuatro elementos considerados básicos por entonces (tierra, agua, aire y fuego) consistían en cuatro clases de átomos, y que esos átomos eran objetos matemáticos de una pequeñez invisible: cubos, icosaedros, octaedros y

tetraedros, respectivamente, es decir, cuatro de los cinco sólidos llamados *platónicos* (figura 7.2). Por ejemplo, él sostenía que los vértices agudos del tetraedro explicaban por qué el fuego causa dolor, que la forma esférica del icosaedro la facilidad del agua para fluir, y que la capacidad única de los cubos para apilarse de forma compacta explicaba la solidez de la Tierra. Aunque esta bella teoría acabó refutada por los hechos observados, algunos aspectos de ella aún perduran, como el planteamiento de que cada elemento fundamental consiste en una clase específica de átomo, y que las propiedades de una sustancia dependen de las propiedades de sus átomos. Es más, en el capítulo 10 defenderé que los elementos constitutivos últimos de nuestro universo son, de hecho, matemáticos, aunque en un sentido distinto al propuesto por Platón: no es que el universo esté formado por objetos matemáticos, sino que forma parte de un único objeto matemático.

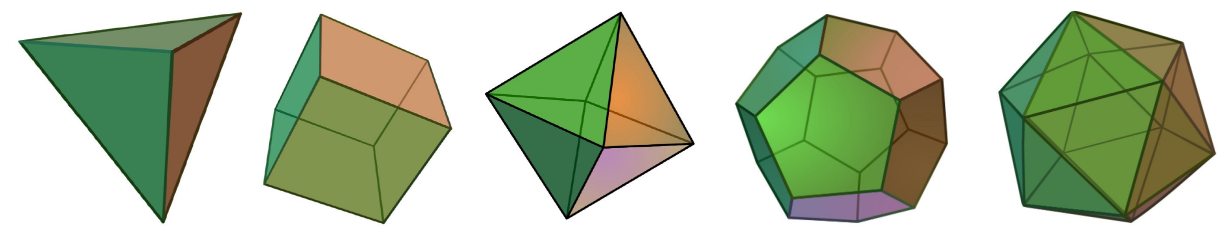


Figura 7.2: Los cinco sólidos platónicos: tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro. Solo el dodecaedro quedó excluido de la teoría atómica de Platón, y a veces se ha considerado un objeto de culto de misteriosa relevancia mítica que aparece en el arte desde las obras de la antigüedad hasta el *Sacramento de la última cena*, de Salvador Dalí.

La teoría moderna de los átomos tardó otros dos mil años en cuajar, y el célebre físico austríaco Ernest Mach se negaba a creer en la realidad de los átomos incluso a comienzos del siglo XX. Sin duda, le habría impactado nuestra capacidad actual para tomar imágenes de átomos individuales (figura 7.1) y hasta para manipularlos.

Legos nucleares

El propio éxito de la hipótesis atómica condujo de manera natural al planteamiento de si *átomo* era un nombre apropiado: si todos los objetos macroscópicos consisten en piezas de Lego más pequeñas que denominamos átomos, ¿no podrían estos dividirse a su vez en alguna suerte de Legos susceptibles de una reordenación?

Veo una elegancia suprema en el hecho de que todos los átomos de la tabla periódica consistan en tan solo *tres* clases de piezas de Lego más

pequeñas, menos aún que los cuatro de la teoría de Platón. Ya nos cruzamos con ellos fugazmente en el capítulo 3, y la figura 7.1 ilustra que esos tres elementos (protones, neutrones y electrones) se distribuyen de forma muy parecida a un sistema planetario en miniatura donde los electrones orbitan alrededor de la esfera compacta de protones y neutrones que denominamos núcleo atómico. Si bien la Tierra se mantiene en su órbita alrededor del Sol debido a la fuerza de atracción gravitatoria que impera entre ambos objetos, los electrones permanecen unidos a los átomos debido a la fuerza eléctrica que los atrae hacia los protones (los electrones tienen carga negativa, los protones tienen carga positiva, y las cargas opuestas se atraen). Como los electrones también se sienten atraídos hacia los protones de otros átomos, favorecen el enlace de distintos átomos entre sí para formar las estructuras mayores que llamamos *moléculas*. Si los núcleos atómicos y los electrones se combinan entre sí sin que cambie la cantidad de cada tipo, entonces decimos que se ha producido una reacción química con independencia de que ocurra con rapidez, como un incendio forestal (que consiste sobre todo en que los átomos de carbono e hidrógeno de la madera y las hojas se combinen con el oxígeno del aire para dar lugar a moléculas de dióxido de carbono y de agua) o de que suceda despacio, como el crecimiento de un árbol (que consiste sobre todo en la reacción inversa propulsada por la luz solar).

Durante siglos, los alquimistas han intentado en vano convertir ciertas clases de átomos en otras, por lo común, las más baratas en otras más caras, como el oro. ¿Por qué fracasaron todos? Cada átomo recibe su nombre sencillamente de acuerdo con el número de protones que contiene (1 = hidrógeno, 79 = oro, etc.), así que está claro que lo que los alquimistas no consiguieron hacer fue jugar a los Legos con los protones y trasladarlos de un átomo a otro. ¿Por qué no lo lograron? Ahora sabemos que no es que fracasaran porque intentaran algo imposible, sino por la simple razón de que ¡no aplicaron suficiente energía! La fuerza eléctrica provoca que cargas iguales se repelan, así que los protones de los núcleos atómicos se dispersarían a menos que alguna fuerza más potente los mantuviera unidos. Justo eso es lo que hace la bien llamada *fuerza nuclear fuerte*, que actúa como una especie de Velcro nuclear que mantiene unidos protones y neutrones cuando se sitúan lo bastante cerca. Es tan fuerte que hace falta una violencia extrema para vencerla: la colisión de dos moléculas de hidrógeno (cada una consistente en un par de átomos de hidrógeno) a 50 kilómetros por segundo basta para descomponerlas y separar sus átomos, pero habría que chocar dos núcleos de helio (consistentes cada uno en dos protones y dos neutrones) a la

vertiginosa velocidad de 36 000 kilómetros por segundo para tener alguna posibilidad de descomponerlos en neutrones y protones separados, lo cual ronda el 12 % de la velocidad de la luz y permitiría viajar de Lisboa a Moscú en una décima de segundo.

En la naturaleza se producen colisiones de esa violencia cuando se alcanzan temperaturas extremas, de millones de grados. En el universo primigenio no había átomos pululando, salvo plasma de hidrógeno (protones aislados), porque con las temperaturas tan elevadas que imperaban, cualquier grupo de protones y neutrones que se agregaran y formaran átomos más pesados quedaba destruido en el acto por las colisiones. A medida que este universo se fue expandiendo y enfriando, hubo un periodo breve de unos pocos minutos en que las colisiones aún eran lo bastante intensas como para vencer la repulsión eléctrica entre protones, pero ya no lo suficiente como para vencer la intensa fuerza «Velero» que los obligaba a ellos y a los neutrones a unirse para formar helio: este fue el periodo de la nucleosíntesis primordial del que habló Gamow y que analizamos en el capítulo 3. En el núcleo del Sol imperan temperaturas que caen dentro de ese rango mágico en el que los átomos de hidrógeno se fusionan en átomos de helio.

Las leyes económicas nos dicen que los átomos son caros si son raros, y las leyes físicas afirman que son raros si necesitan unas temperaturas excepcionalmente elevadas para formarse. La unión de ambas afirmaciones revela que si los átomos pudieran hablar, los más caros contarían las mejores historias. Los átomos más comunes, como el carbono, el nitrógeno y el oxígeno (que junto con el hidrógeno conforman el 96 % del peso de nuestro cuerpo), son tan baratos porque las estrellas comunes, como el Sol, los producen en las etapas finales de su existencia, tras lo cual dan lugar a sistemas planetarios nuevos mediante un proceso de reciclaje cósmico. El oro, en cambio, se forma cuando las estrellas fenecen en una explosión de supernova, un suceso tan violento e inusitado que, durante una fracción de segundo, libera tanta energía como todas las demás estrellas del universo observable juntas. No es de extrañar que la fabricación de oro quedara fuera del alcance de los alquimistas.

Los Legos de la física de partículas

Si la materia cotidiana está formada por átomos, y los átomos consisten en piezas menores (neutrones, protones y electrones), ¿están formadas estas a su

vez por Legos más pequeños aún? La historia nos ha enseñado a abordar esta cuestión de manera experimental: hagamos que los elementos constitutivos más pequeños que conocemos choquen entre sí con auténtica fuerza y observemos si se rompen. Este procedimiento se ha practicado en colisionadores de partículas cada vez mayores, pero los electrones aún no han dado ninguna muestra de que consistan en algo más pequeño, a pesar de haberlos hecho colisionar al 99,999999999 % de la velocidad de la luz en el Laboratorio del CERN situado a las afueras de Ginebra. La colisión de protones, por su parte, ha revelado que tanto ellos como los neutrones consisten en partículas más pequeñas denominadas *quark arriba* y *quark abajo*. Dos arriba y un abajo forman un protón (figura 7.1), mientras que dos abajo y un arriba constituyen un neutrón. Es más, la colisión de partículas ha producido cierta cantidad de partículas desconocidas con anterioridad (véase la figura 7.3).

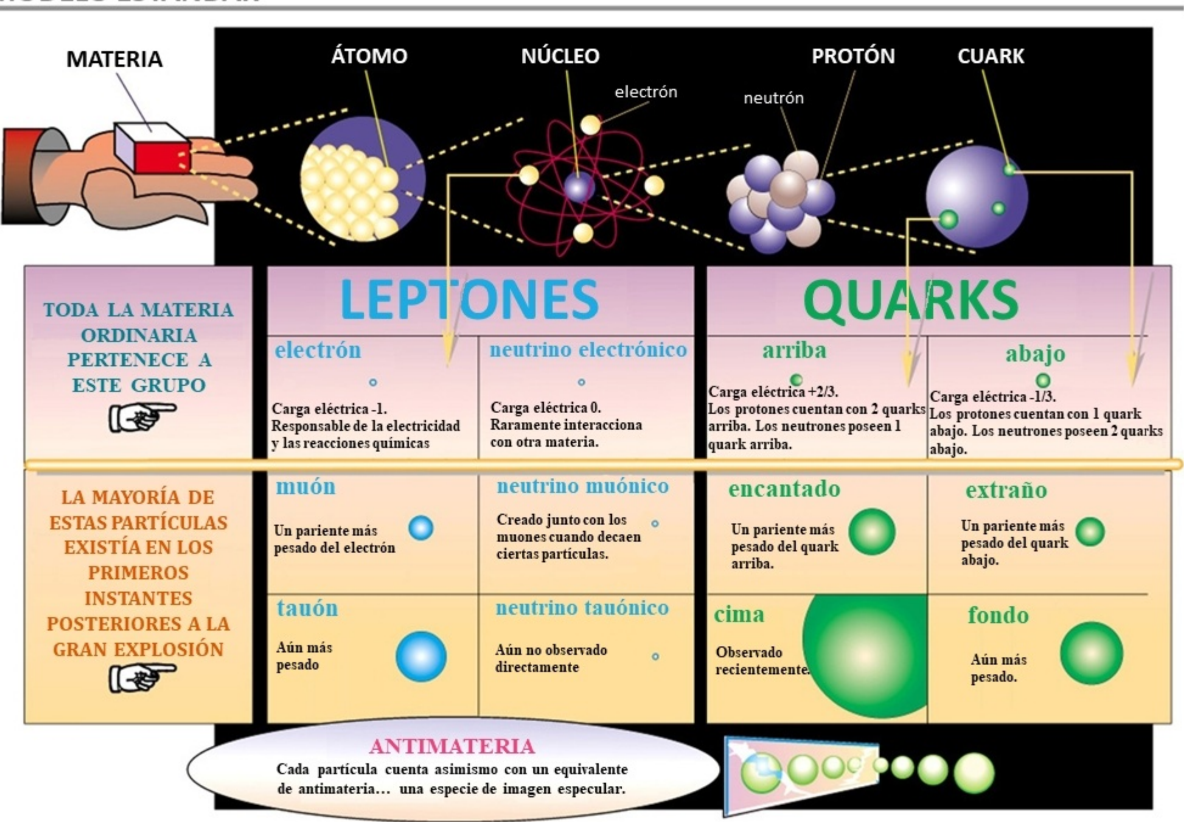


Figura 7.3: Modelo estándar actual en física de partículas (*Crédito de ilustración: CERN*).

Todas estas partículas nuevas y de nombres exóticos, como los *piones, caones, sigmas, omegas, muones, tauones, bosones W* y *bosones* Z, son inestables y decaen en materia más habitual en una fracción de segundo, y astutas labores detectivescas han revelado que todos ellos, excepto los cuatro

últimos, consisten en quarks, no solo arriba y abajo, sino también cuatro variantes inestables más que se conocen como *quarks extraño*, *encantado, fondo* y *cima*. Se ha descubierto que los bosones *W* y Z son los responsables de transmitir la denominada fuerza débil que interviene en radiactividad, y son primos gordos y mayores del bosón que llamamos *fotón*, la partícula de la que está hecha la luz y que transmite la fuerza electromagnética. Se ha sabido que otros miembros de la familia de los bosones conocidos como *gluones* son los responsables de aglutinar quarks para formar partículas mayores, y el *bosón de Higgs*, descubierto recientemente, confiere masa a otras partículas. Además, se han hallado partículas fantasmagóricas estables que se conocen como *neutrinos electrónicos, neutrinos muónicos* y *neutrinos tauónicos*, nos los topamos en el capítulo anterior, y son tan esquivos que apenas llegan a interaccionar con otras partículas: si un neutrino se estrella contra el suelo, lo habitual es que lo atraviese, salga indemne por el otro lado del planeta y prosiga su viaje por el espacio. Para terminar, casi todas estas partículas cuentan con un gemelo perverso llamado *antipartícula* con la propiedad de que, si ambos chocan, pueden aniquilarse entre sí en un estallido de energía pura. En la tabla 7.2 se resumen las partículas clave y los conceptos relacionados que aparecen en este libro.

Hasta el momento no se ha encontrado ningún signo de que alguno de estos bosones, quarks, leptones (el nombre colectivo para el electrón, el muón, el tauón y los neutrinos) o sus antipartículas consistan en piezas más pequeñas o más elementales. Sin embargo, como los quarks son piezas elementales situadas en el tercer nivel inferior de la jerarquía Lego (figura 7.1), no hay que ser Sherlock Holmes para empezar a plantearse si habrá más niveles que no alcanzamos a descubrir por la sencilla razón de que no contamos con la energía suficiente en los aceleradores de partículas. De hecho, tal como apuntamos en el capítulo 6, la teoría de cuerdas sugiere justamente esto: que si pudiéramos obligarlos a chocar con mucha más energía que ahora (tal vez 10 billones de veces más), descubriríamos que todo consiste en diminutas cuerdas vibrantes, y que cada clase distinta de vibración del mismo tipo básico de cuerda se correspondería con distintos tipos de partículas, de manera semejante a como cada tipo de vibración de la cuerda de una guitarra se corresponde con distintas notas musicales. La teoría que rivaliza con esta y que se conoce como gravitación cuántica de lazos apunta a que todo consiste, no en cuerdas, sino en lo que se denomina una red de espín de lazos cuantizados de campos gravitatorios excitados. Es decir, un trabalenguas de cuidado, así que si usted no capta todo su significado, no se

preocupe, porque hasta los especialistas más consagrados en teoría de cuerdas y en gravitación cuántica de lazos reconocen que aún no comprenden por entero sus propias teorías… Entonces ¿de qué está hecho todo en última instancia? Basándonos en los indicios experimentales más recientes, la respuesta está clara: simplemente no lo sabemos todavía, pero hay buenas razones para sospechar que todo lo que conocemos hasta ahora (incluido el mismísimo tejido del espacio-tiempo) está formado en última instancia por piezas constitutivas más fundamentales.

Legos matemáticos

Aunque aún no sepamos de qué está hecho todo, hemos descubierto otra pista fascinante que tengo que contarle. A mí me suena bastante demencial que el choque de dos protones en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN pueda dar lugar a un bosón Z 97 veces más pesado que un protón. Antes creía que la masa se conserva: ¿verdad que no se puede obtener un trasatlántico haciendo chocar dos Ferraris, porque pesaría más que ambos coches juntos? Sin embargo, si la creación de partículas nuevas de este modo le suena tan fraudulenta como un timo piramidal, recuerde que Einstein nos enseña que la energía E se puede convertir en masa m mediante la fórmula $E = mc^2$, donde c se corresponde con la velocidad de la luz. Así que, si disponemos de gran cantidad de energía cinética durante una colisión de partículas, entonces parte de esa energía puede adoptar la forma de partículas nuevas. En otras palabras, la energía total se conserva (permanece igual), pero una colisión de partículas reordena esa energía disponible de otras maneras que pueden conllevar la conversión de parte de ella en otras partículas que no estaban ahí de partida. Lo mismo ocurre con la *cantidad de movimiento*[26], la cantidad total se conserva, pero se redistribuye durante la colisión, igual que en el juego del billar la bola blanca se frena cuando desplaza hacia una tronera otra bola que antes estaba quieta. Uno de los descubrimientos más importantes en física ha sido que existen cantidades adicionales que, al igual que la energía y la cantidad de movimiento, siempre parecen conservarse: la *carga eléctrica* constituye el ejemplo más conocido, pero también se sabe de otras clases de cantidades conservadas con nombres como *isoespín* y *color*. Asimismo, hay cantidades que se conservan en muchas circunstancias relevantes, entre las que destacan el número leptónico (la cantidad de leptones menos la cantidad de antileptones) y el número bariónico (la cantidad de quarks menos la

cantidad de antiquarks, dividida entre tres, de forma que los neutrones y protones valgan +1). La tabla 7.1 relaciona esas cantidades (llamadas *números cuánticos*) y sus valores para diversas partículas. Como se ve, muchos de ellos son números enteros o fracciones simples, y tres de las masas no están bien medidas.

Nombre de la partí cula	**Masa en MeV**	**Carga**	**Espín**	**Iso espín**	**Número barió nico**	**Número leptó nico**
Protón	938,3	1	1/2	1/2	1	0
Neutrón	939,6	0	1/2	1/2	1	0
Electrón	0,511	−1	1/2	−1/2	0	1
Quark arriba	1,5-4	2/3	1/2	1/2	1/3	0
Quark abajo	4-8	−1/3	1/2	−1/3	1/3	0
Neutrino electrónico	$<10^{-6}$	0	1/2	1/2	0	1
Fotón	0	0	1	0	0	0

Tabla 7.1: Todas las partículas elementales se describen mediante su propia serie única de *números cuánticos*, y esta tabla reúne una muestra. Las partículas son objetos puramente matemáticos en tanto que no tienen ninguna propiedad en absoluto aparte de sus números cuánticos. La masa indicada equivale a la cantidad de energía necesaria para crear la partícula en reposo. La curiosa unidad MeV es la cantidad de energía cinética que adquiere un electrón si se usa un millón de voltios para acelerarlo.

Recuerdo aquel chiste de la época de la Guerra Fría que decía que en el Oeste estaba permitido todo lo que no estaba prohibido, mientras que en el Este estaba prohibido todo lo que no estaba permitido. Curiosamente, la física de partículas parece preferir la primera opción: en la naturaleza parecen darse todas las reacciones que no están prohibidas (por violar alguna ley de conservación). Esto significa que podemos considerar los Legos fundamentales de la física de partículas, no como partículas en sí, sino como ¡cantidades conservadas! Así que la física de partículas no es más que la reorganización de la energía, la cantidad de movimiento, la carga y otras cantidades conservadas de maneras nuevas. Por ejemplo, la tabla 7.1 revela que la receta culinaria para crear un quark arriba consiste en combinar 2/3 de unidades de carga, 1/2 de unidades de espín, 1/2 de unidades de isoespín, 1/3 de unidades del número bariónico y, como guinda final, unos MeV de energía.

Entonces ¿de qué están hechos los números cuánticos como la energía y la carga? De nada: ¡no son más que números! Un gato también tiene energía y carga, pero además posee muchas otras características adicionales a esos números, como son un nombre, un olor y una personalidad, así que sonaría descabellado afirmar que el gato es un objeto puramente matemático que se describe por entero mediante esos dos números. En cambio, nuestras amigas

las partículas elementales se describen en su totalidad mediante sus números cuánticos, ¡y parecen carecer por completo de propiedades intrínsecas al margen de esos números! En este sentido acabamos de cerrar el círculo de la idea platónica: los Legos fundamentales de los que está hecho todo parecen tener una naturaleza puramente matemática, puesto que no tienen ninguna propiedad al margen de las propiedades matemáticas. Retomaremos esta idea para ahondar en sus detalles en el capítulo 10, donde veremos que no es más que la punta de un iceberg matemático.

A un nivel más técnico, a algunos físicos de partículas les gusta despachar con rapidez la pregunta «¿Qué es una partícula?» diciendo que «es un elemento de una representación irreducible del grupo de simetría de la lagrangiana». O sea, con un trabalenguas que basta para parar en seco la mayoría de las conversaciones incipientes, aunque se trata de algo completamente matemático, si bien un poco más general que el concepto de un conjunto de números. Y sí, sin duda, la teoría de cuerdas o cualquiera de las que compiten con ella pueden ampliar nuestro conocimiento de qué son en realidad las partículas, pero las principales teorías existentes se limitan a sustituir una entidad matemática por otra. Por ejemplo, si los números cuánticos de la tabla 7.1 resultan corresponderse con distintos tipos de vibraciones de supercuerdas, entonces no deberíamos concebir esas cuerdas como pequeños objetos imprecisos con unas propiedades intrínsecas equivalentes a estar hechos de pelos de gato trenzados de color castaño claro, sino que deberíamos entenderlas como puras construcciones matemáticas que los físicos han llamado *cuerdas* sencillamente para enfatizar su naturaleza unidimensional y para establecer una analogía con algo que suene menos matemático y más familiar.

En resumen, la naturaleza posee una estructura jerárquica de Legos. Si mi hijo Alexander jugara con normalidad con su regalo de cumpleaños, solo podría reorganizar las piezas de Lego tal como vienen de fábrica. Si jugara a los Legos atómicos arrojándolos al fuego o bañándolos en ácido, o empleando cualquier otro método alternativo para redistribuir sus átomos, estaría practicando química. Si jugara a los Legos nucleares redistribuyendo los neutrones y protones en distintos tipos de átomos, practicaría física nuclear. Si chocara las piezas entre sí a velocidades cercanas a la de la luz para redistribuir la energía, la cantidad de movimiento, la carga, etc., de los neutrones, protones y electrones en nuevas partículas, estaría realizando física de partículas. Los Legos del nivel más profundo parecen ser objetos puramente matemáticos.

Legos de fotones

No solo la materia se compone de elementos constitutivos esenciales del mismo tipo que las piezas de Lego. Como dijimos en la parte 1 de este libro, eso mismo le ocurre a la luz, que se compone de partículas llamadas *fotones*, según dedujo Einstein en 1905.

Cuatro décadas antes, James Clerk Maxwell había descubierto que la luz es una onda electromagnética, una especie de perturbación eléctrica. Si pudiéramos medir con minuciosidad el voltaje entre dos puntos de un rayo de luz, descubriríamos que oscila con el tiempo; la frecuencia f de tal oscilación (cuántas veces oscila por segundo) determina el color de la luz, y la intensidad de la oscilación (el máximo de voltios registrados) establece la intensidad de la luz. El omniscopio del que hablamos en el capítulo 4 mide esos voltajes. Los humanos otorgamos distintos nombres a esas ondas electromagnéticas según su frecuencia (de menor a mayor frecuencia, las llamamos *ondas de radio*, microondas, infrarrojos, luz roja, naranja, amarilla, verde, azul, violeta, ultravioleta, rayos X, rayos gamma), pero todas ellas son formas de luz y consisten en fotones. Cuantos más fotones por segundo emite un objeto, más brillante se muestra.

Einstein se dio cuenta de que la cantidad de energía E de un fotón viene dada por su frecuencia f a través de la sencilla fórmula $E = hf$, donde h es la constante de la naturaleza que se conoce como constante de Planck. La constante h es pequeñísima, así que un fotón normal porta muy poca energía en sí mismo. Cuando nos tumbamos en la playa durante un solo segundo, recibimos el calor de 1000 trillones (10^{21}) de fotones, por eso percibimos un flujo continuo de luz. Sin embargo, si mis amigos llevan gafas de sol que bloquean el 90 % de la luz y me pongo 21 de esas gafas a la vez, entonces solo las atravesará uno de esos fotones originales por segundo, lo que podríamos comprobar con cualquier detector de fotones de alta sensibilidad.

Einstein recibió el Premio Nobel porque usó esta idea para explicar el llamado *efecto fotoeléctrico*, y con ello se descubrió que la capacidad de la luz para desprender electrones de los metales depende tan solo de la frecuencia (la energía de los fotones), no de la intensidad (la cantidad de fotones). Los fotones de baja frecuencia no tienen suficiente energía para lograrlo, igual que pelotas de tenis lanzadas a baja energía no rompen una ventana de cristal, por muchas que sean. El efecto fotoeléctrico está

relacionado con los procesos que se usan hoy en día en los paneles solares y los sensores de imagen de las cámaras digitales.

Mi tocayo Max Planck recibió el Premio Nobel de 1918 por revelar que la idea de los fotones también resolvía otro misterio notable: Por qué las mediciones previas de la radiación calorífica de un objeto incandescente no eran correctas. El arcoíris (figura 2.5) evidencia el espectro de la luz solar, es decir, cuánta cantidad de su luz hay en cada una de las diferentes frecuencias. La gente sabía que la temperatura T de algo es una medida de la rapidez con la que se mueven sus partículas, y que la energía del movimiento E habitual de una partícula venía dada por la fórmula $E = kT$, donde k es un número que se conoce como constante de Boltzmann. Cuando las partículas del Sol chocan entre sí, apenas una cantidad kT de energía del movimiento se puede convertir en energía lumínica. Por desgracia, la predicción detallada para el arcoíris era la llamada *catástrofe* ultravioleta: que la intensidad de la luz seguiría aumentando siempre hacia la derecha en la figura 2.5 (hacia las frecuencias más altas), de forma que los rayos gamma nos cegarían al mirar cualquier objeto caliente como, por ejemplo, nuestro mejor amigo. Lo que nos libra de eso es que la luz está formada por partículas: el Sol puede irradiar energía lumínica solo produciendo los fotones de uno en uno, y la energía típica disponible kT para fabricar un fotón es muy inferior a la cantidad de energía hf necesaria para generar siquiera un solo rayo gamma.

Prontuario de física de partículas	
Cantidad de movimiento	El ímpetu inherente a algo cuando choca contra algo o, con más rigor, la cantidad de tiempo que tardaríamos en pararlo multiplicada por el promedio de la fuerza que habría que aplicar para ello
Momento angular	La cantidad de giro de algo o, con más rigor, la cantidad de tiempo que tardaríamos en conseguir que dejara de girar multiplicada por el promedio del momento de la fuerza (fuerza de torsión) que habría que aplicar
Espín	El momento angular de una partícula individual que gira alrededor de su centro
Cantidad conservada	La cantidad que se mantiene constante a lo largo del tiempo y no se puede crear ni destruir. Ejemplos de ella son la energía, la cantidad de movimiento, el momento angular, la carga eléctrica.
Átomo	Conjunto de electrones que orbitan alrededor de un núcleo de protones y neutrones; el nombre de cada átomo depende de la cantidad de protones que porta en su interior (1 = hidrógeno, 2 = helio, etc.)
Electrón	Partícula con carga negativa de la que están hechas las corrientes eléctricas
Protón	Partícula con carga positiva que se encuentra en el interior de los núcleos atómicos y que se compone de dos quarks arriba y un quark abajo.
Neutrón	Partícula sin carga eléctrica que se encuentra en el interior de los núcleos atómicos y que consiste en dos quarks abajo y un quark arriba.
Fotón	Partícula de luz

Gluon	Partícula que ayuda a aglutinar tripletes de quarks en protones y neutrones
Neutrino	Partícula tan esquiva que es capaz de atravesar con frecuencia la Tierra sin interaccionar con nada
Fermión	Partícula que no puede encontrarse en el mismo lugar y estado que otra partícula idéntica. Ejemplos: electrones, quarks, neutrinos
Bosón	Partícula a la que le gusta estar en el mismo sitio y estado que otra partícula idéntica. Ejemplos: fotones, gluones, partículas de Higgs

Tabla 7.2: Guía de los principales términos físicos para entender el micromundo.

¿Al margen de la ley?

Entonces, si todo se compone de partículas ¿qué leyes de la física rigen? En particular, si supiéramos qué están haciendo todas las partículas del universo en este mismo instante, ¿qué ecuación nos permitiría calcular qué harán en el futuro? Si existiera tal ecuación, contaríamos con que nos permitiera (al menos en principio) predecir todos los aspectos del futuro a partir del presente, desde la trayectoria futura de la pelota durante un partido de béisbol, hasta los ganadores de los Juegos Olímpicos de 2048: bastará con calcular qué harán todas las partículas para obtener la respuesta.

La buena noticia es que parece existir una ecuación así, la llamada *ecuación de Schrödinger* (figura 7.4). La mala noticia es que no predice exactamente qué harán las partículas, y que casi un siglo después de que la desarrollara el físico austríaco Erwin Schrödinger, los físicos aún discuten qué hacer con ella.

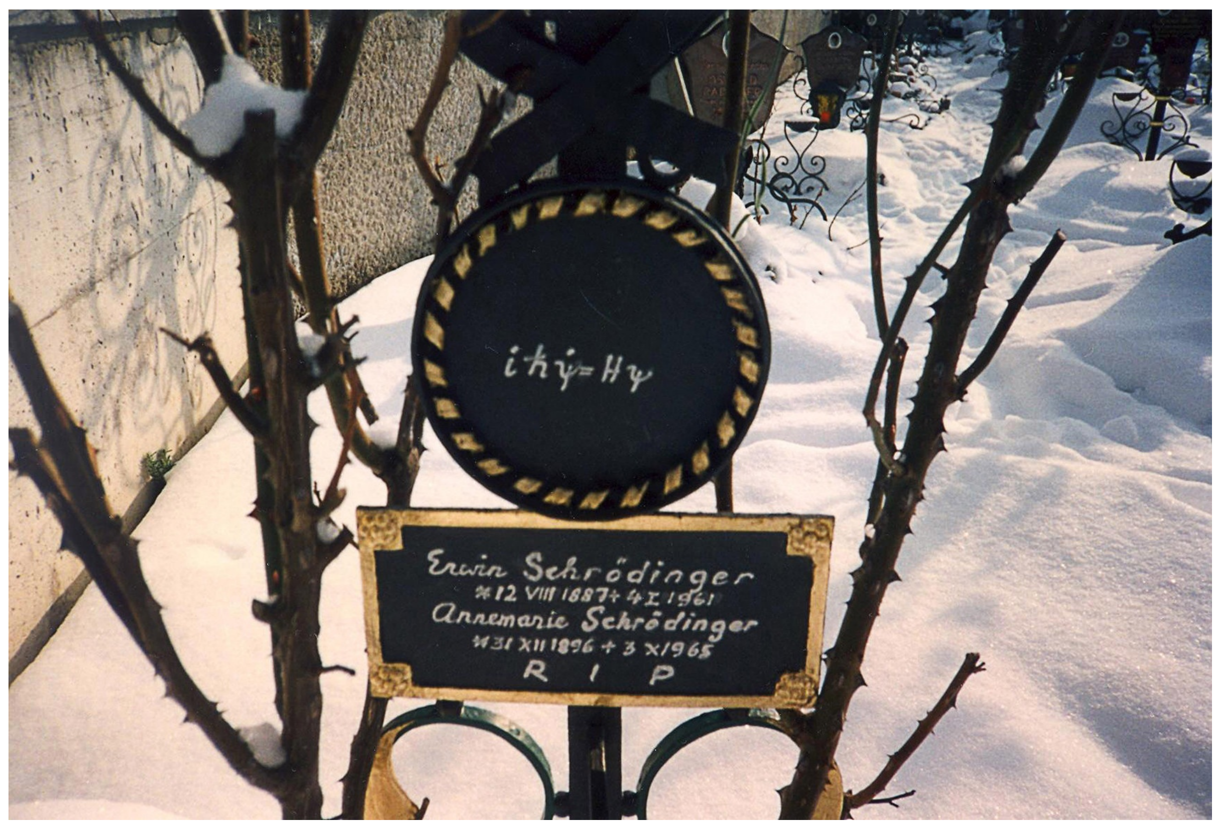


Figura 7.4: La ecuación de Schrödinger sigue viva. Desde que tomé esta fotografía en 1996, las letras de la inscripción han cambiado misteriosamente. ¿Es que no acabará nunca el enigma cuántico?

En lo que todos coinciden es en que las partículas microscópicas no obedecen las leyes clásicas de la física que nos enseñaron en la escuela. Dado que el átomo recuerda a un sistema planetario en miniatura (figura 7.1), parecería bastante natural suponer que sus electrones orbitan alrededor del núcleo siguiendo las leyes de Newton, del mismo modo que los planetas orbitan alrededor del Sol. De hecho, al realizar los cálculos las cosas parecen prometedoras en un principio. Aplicando una fuerza a la cuerda de un yoyó, usted puede hacerlo girar alrededor de su cabeza; si la cuerda se rompiera, el yoyó saldría volando en línea recta con una velocidad constante, así que la fuerza aplicada es la necesaria para desviarlo de ese movimiento rectilíneo y lograr que se mueva en círculo. Dentro del Sistema Solar no es una cuerda, sino la gravitación del Sol lo que aporta esa fuerza, y en el interior de un átomo la fuerza la proporciona la atracción eléctrica del núcleo. Si se efectúan los cálculos para una órbita del tamaño de un átomo de hidrógeno, se predice que el electrón orbita con una velocidad semejante a la medida en laboratorio: ¡todo un logro teórico! Sin embargo, para ser más rigurosos, debemos introducir un efecto adicional en los cálculos: cuando un electrón se acelera (cambia de velocidad o de dirección de movimiento), irradia energía. Los teléfonos móviles aprovechan esta propiedad sacudiendo los electrones

próximos a su antena para transmitir ondas de radio. Como la energía se conserva, la energía irradiada de este modo tiene que provenir de algún lugar. En el caso del teléfono, procede de la batería, pero en los átomos de hidrógeno solo podría extraerse de la energía del movimiento del electrón, lo cual lo precipitaría cada vez más hacia el núcleo atómico, del mismo modo que la resistencia del aire en la alta atmósfera hace que los satélites en órbita baja alrededor de la Tierra pierdan energía cinética y con el tiempo acaben cayendo al suelo. Esto indica que la órbita del electrón no sería circular, sino una espiral suicida (figura 7.5): después de unas 100 000 órbitas, el electrón se estrellaría contra el protón, y el átomo de hidrógeno se colapsaría a la edad madura de unos 0,02 nanosegundos[27].

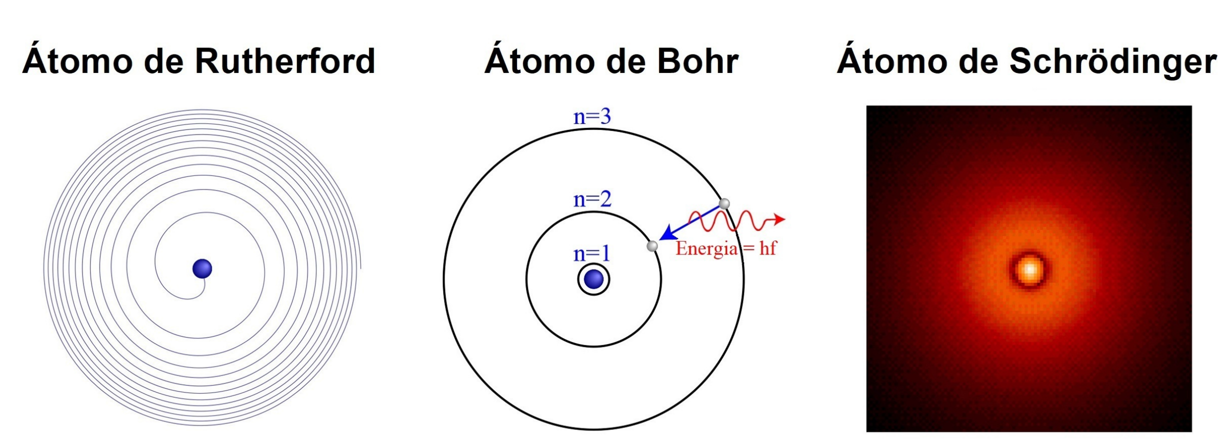


Figura 7.5: Evolución de las distintas interpretaciones de un átomo de hidrógeno. Por desgracia, el modelo clásico de «sistema planetario» desarrollado por Ernest Rutherford era inestable, y el electrón caía en espiral hacia el protón situado en el centro (mi ilustración lo representa como si la fuerza eléctrica fuera 20 veces mayor, porque de otro modo habría que dibujar unas 100 000 vueltas en espiral y la gráfica resultaría ilegible). El modelo de Bohr confina el electrón a órbitas discretas y numeradas $n = 1, 2, 3$, etc., entre las cuales puede saltar mediante la emisión o absorción de fotones, pero falla con todos los átomos salvo con el de hidrógeno. El modelo de Schrödinger tiene un solo electrón en muchos lugares al mismo tiempo, dentro de una «nube de electrones» cuya forma viene dada por lo que se denomina una función de onda ψ.

Esto no es bueno, nada bueno. No estamos hablando de una discrepancia menor del 1 % entre la teoría y la experimentación, sino de una predicción que dice que todos los átomos de hidrógeno (así como todos los demás átomos) del universo acaban colapsándose en la milmillonésima parte del tiempo que se tarda en leer la última palabra de esta frase. De hecho, como la mayoría de los átomos de hidrógeno han existido durante los últimos catorce mil millones de años, su duración ha superado en más de 28 órdenes de magnitud el tiempo que les pronosticaba la física clásica, lo cual atribuyó a esa predicción el penoso mérito de ser el mayor fallo cuantitativo de la física hasta que la superó el desfase de 123 órdenes de magnitud entre la predicción

y la medición de la densidad de la energía oscura que comentamos en el capítulo 3.

Cuando los físicos dieron por supuesto que las partículas elementales obedecían las leyes clásicas de la física, se encontraron también con otros problemas. Por ejemplo, descubrieron que la cantidad de energía necesaria para calentar objetos muy fríos es inferior a la predicha. Hubo más contratiempos, pero no vale la pena que sigamos insistiendo en ello, porque el mensaje de la naturaleza es transparente como el cristal: las partículas microscópicas violan las leyes de la física clásica.

Entonces, ¿es que las partículas microscópicas están al margen de la ley? No, obedecen una ley distinta: la ley de Schrödinger.

Cuantos y arcoíris

Para explicar cómo funcionan los átomos, el físico danés Niels Bohr introdujo una idea revolucionaria en 1913: quizá no solo la materia y la luz estuvieran cuantizadas (consistieran en piezas sueltas como las de Lego), sino también algunos aspectos del movimiento. ¿Y si el movimiento no fuera continuo, sino a saltos, como en el juego de ordenador PAC-MAN o como en una película antigua de Chaplin reproducida a cámara lenta? La figura 7.5 ilustra el modelo de átomo de Bohr: las órbitas circulares solo están permitidas si los círculos poseen determinadas dimensiones mágicas. Existe una órbita mínima permitida, etiquetada como $n = 1$ y, luego, existen otras órbitas mayores marcadas con $n = 2$, etc., cuyo radio es n^2 veces el radio de la circunferencia más pequeña**[28]**.

El primer logro, y también el más notorio, es que el átomo de Bohr no se puede colapsar como el átomo clásico, situado a su izquierda en la figura 7.5; cuando el electrón se encuentra en la órbita interior, lo único que sucede es que no dispone de ninguna otra órbita menor a la que trasladarse. Pero el modelo de Bohr explica mucho más. Las órbitas más altas tienen más energía que las más bajas, y la energía total se conserva, así que siempre que el electrón salta al estilo PAC-MAN para situarse en una órbita más baja, el átomo se ve obligado a emitir la energía sobrante convertida en un fotón (véase la figura 7.5), y para volver a saltar a una órbita superior, el electrón debe ser capaz de pagar el coste de energía mediante la absorción de un fotón entrante con la energía necesaria. Como solo existe una serie específica de energías orbitales, esto significa que el átomo solo puede emitir o absorber

fotones con ciertas energías mágicas. En otras palabras, un átomo solo puede emitir o absorber luz de determinadas frecuencias especiales. Esto resolvió un viejo misterio: se sabía que el arcoíris de la luz solar (figura 2.5) presenta líneas oscuras en ciertas frecuencias misteriosas (determinados colores se pierden), y durante el estudio en laboratorio de gases incandescentes se había observado que cada tipo de átomo tiene una huella espectral única de acuerdo con las frecuencias de luz que es capaz de emitir y de absorber. El modelo del átomo de Bohr no solo explicó estas líneas espectrales, sino también sus frecuencias exactas para el hidrógeno[29].

Eso era lo bueno y lo que le valió a Bohr el Premio Nobel (igual que a la mayoría de las personalidades que menciono en este capítulo). Lo malo era que el modelo de Bohr no funcionaba con átomos distintos del hidrógeno, salvo si se los despojaba de todos sus electrones excepto uno.

Formación de ondas

A pesar de estos logros tempranos, los físicos aún no saben cómo interpretar estas extrañas reglas cuánticas que parecen ser *ad hoc*. ¿Qué significan en realidad? ¿Por qué está cuantizado el momento angular? ¿Tiene todo ello una explicación más profunda?

Louis de Broglie propuso una: que el electrón (y, de hecho, todas las partículas) tiene propiedades propias de las ondas a ciertas frecuencias especiales, de modo que ¿podría ser que algo análogo determinara las frecuencias con las que los electrones orbitan dentro de los átomos?

Dos ondas pueden cruzarse entre sí sin ninguna repercusión para ellas, como las ondas circulares del depósito de agua de la figura 7.6 (izquierda); en cualquier momento, sus efectos sencillamente se suman entre sí. En ciertos lugares las crestas de ambas ondas se superponen y forman una cresta más alta (es lo que se llama *interferencia constructiva)*, en otros se ve que la cresta de una de las ondas anula el valle de otra y deja el agua completamente inalterada (es la denominada *interferencia destructiva*). En la superficie del Sol (figura 7.6, centro), se han observado ondas sonoras dentro del gas incandescente/plasma. Si una de esas ondas se propaga por todo el Sol (derecha), se anulará a sí misma con interferencia destructiva a menos que efectúe exactamente una cantidad entera de oscilaciones a medida que avance, de forma que permanezca sincronizada consigo misma. Esto significa que, al

igual que una flauta, el Sol solo vibra con determinadas frecuencias especiales[30].

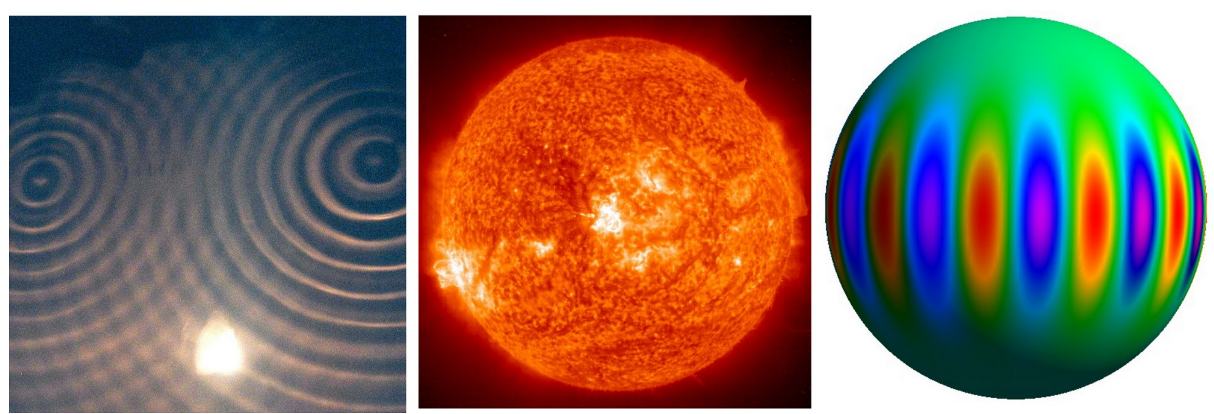


Figura 7.6: Ondas en un depósito de agua (izquierda) y en el Sol (derecha).

En su tesis doctoral de 1924, De Broglie aplicó este razonamiento a las ondas que se desplazan por el átomo de hidrógeno, en lugar del Sol, y encontró justo las mismas frecuencias y energías que predecía el modelo de Bohr. Una demostración más directa de que las partículas se comportan como ondas se obtiene mediante el experimento de la doble rendija que ilustra la figura 7.7.

Esta descripción ondulatoria también ofrece una idea más intuitiva de por qué los átomos no se colapsan tal como predice la física clásica: al intentar confinar una onda en un espacio muy reducido, de inmediato empieza a expandirse. Por ejemplo, si una gota de lluvia cae en un depósito de agua, al principio perturbará el agua únicamente en la pequeña área donde cayó, pero esa perturbación se propaga enseguida hacia fuera en todas direcciones como una serie de ondas circulares, igual que las ondas de la figura 7.6 (izquierda). Esta es la esencia del *principio de incertidumbre de Heisenberg*. Werner Heisenberg evidenció que si se confina algo en una región pequeña del espacio, ese algo tendrá una cantidad de movimiento aleatorio enorme, lo que tiende a dispersarlo y a reducir el confinamiento. En otras palabras, ¡un objeto no puede tener de manera simultánea una posición exacta y una velocidad exacta![31] Esto significa que si un átomo de hidrógeno intenta colapsarse como en la figura 7.5 (izquierda) succionando el electrón hacia el protón, entonces el electrón cada vez más confinado adquirirá suficiente cantidad de movimiento y velocidad como para salir despedido de nuevo hacia una órbita más alta.

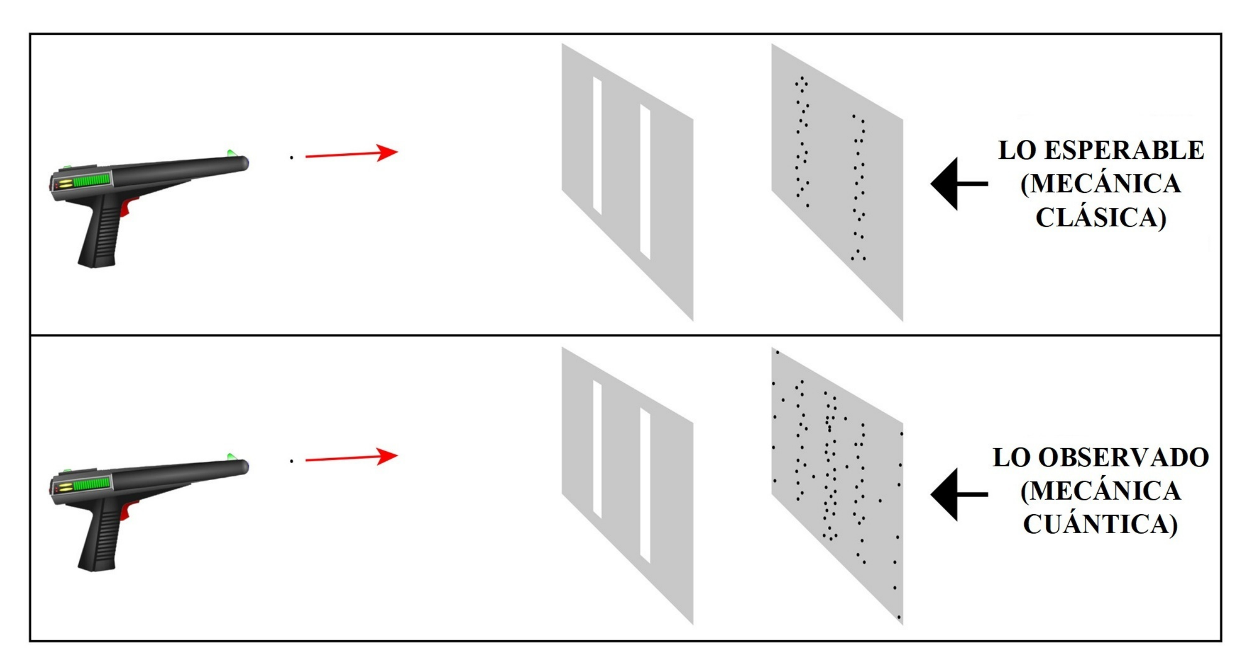


Figura 7.7: Al disparar partículas (por ejemplo, electrones o fotones con una pistola láser) contra una barrera provista de dos rendijas verticales, la física clásica predice que impactarán contra el detector situado detrás de las rendijas formando dos bandas verticales. En cambio, la mecánica cuántica predice que cada partícula se comportará como una onda y atravesará *ambas* rendijas en un estado de superposición cuántica, interferirá consigo misma y creará un patrón de interferencia similar al de la figura 7.6. La ejecución de este famoso experimento de la doble rendija revela que la mecánica cuántica es correcta: se detectan partículas a lo largo de toda una serie de bandas verticales.

La tesis de Broglie generó ondas, y en noviembre de 1925 Erwin Schrödinger dio un seminario sobre esto en Zúrich. Cuando acabó, Peter Debye dijo en efecto: «Habla usted de ondas, pero ¿dónde está la ecuación de onda?». Schrödinger acabó desarrollando y publicando su famosa ecuación de onda (figura 7.4), la llave maestra de gran parte de la física moderna. Por la misma época, Max Born, Pasqual Jordán y Werner Heisenberg ofrecieron una formulación equivalente con tablas de números llamadas *matrices*. Con este nuevo y trascendental apoyo matemático, la teoría cuántica logró avances explosivos. En cuestión de pocos años se explicaron un buen montón de mediciones que no se habían podido interpretar hasta entonces, incluidos los espectros de átomos más complejos y varios números que describen propiedades de reacciones químicas. Con el tiempo, esta física cuántica nos proporcionó el láser, el transistor, el circuito integrado, los ordenadores y los teléfonos inteligentes. Otros éxitos de la mecánica cuántica guardan relación con su prolongación, la teoría cuántica de campos, en la cual se basan hoy investigaciones al límite del conocimiento, como el estudio de las partículas de la materia oscura.

¿Cuál es la seña de identidad de la buena ciencia? Existen varias definiciones de ciencia que me gustan, y una de ellas habla de la *compresión*

de los datos, que consiste en explicar mucho con poco. Las buenas teorías científicas dan más de lo que recibieron. Acabo de aplicar un programa normal de compresión de datos al archivo de texto que contiene el borrador de este capítulo y he obtenido una compresión triple porque el programa usó las regularidades y patrones que encontró en mi prosa. Comparemos esto con la mecánica cuántica. Acabo de descargarme una lista de más de 20 000 líneas espectrales de **http://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD/lines1.pl** cuya frecuencia se ha medido con toda meticulosidad en laboratorios de todo el mundo, y la ecuación de Schrödinger es capaz de captar los patrones y regularidades de esos números y comprimir esos datos hasta reducirlos a tan solo tres números: la llamada constante de estructura fina $\alpha \approx 1/137{,}036$, que mide la intensidad del electromagnetismo, el número 1836,15, que es cuántas veces más pesa el protón que el electrón, y la frecuencia orbital del hidrógeno[32]. Esta compresión de datos viene a ser lo mismo ¡que reducir todo este libro a una sola frase!

En el Instituto Max Planck de Física de Múnich, donde realicé una estancia posdoctoral, la fotocopiadora de la biblioteca solía tardar eones en calentarse, y yo me entretenía mientras tanto sacando libros clásicos de las estanterías. Una vez di con un ejemplar de *Annalen der Physik* de 1926, y me sorprendió descubrir que la esencia de todo lo que habíamos visto en las clases de física cuántica durante los estudios de grado aparecía desarrollado en cuatro de aquellos artículos de 1926. Admiro a Schrödinger porque no solo era brillante, sino también un librepensador: cuestionaba la autoridad, pensaba por sí mismo y hacía lo que consideraba correcto. Después de conseguir el puesto de profesor que antes tuvo Max Planck en Berlín, uno de los cargos más prestigiosos del mundo, renunció a él porque no toleraba la persecución nazi contra sus compañeros judíos. Más tarde rechazó una oferta laboral de Princeton porque no aceptaban su heterodoxia familiar (vivía con dos mujeres y tenía un hijo con la que no era su esposa). De hecho, cuando visité su tumba tras una peregrinación durante unas vacaciones para esquiar en Austria, descubrí que este librepensador tampoco gozó de muy buena acogida en su pueblo natal: en la foto que saqué de su sepultura (figura 7.4) se ve que la pequeña localidad de Alpbach enterró al hijo más célebre que ha tenido jamás en una tumba bastante modesta en un lateral del cementerio…

Rareza cuántica

Pero ¿qué significaba todo aquello? ¿Qué eran esas ondas que describía la ecuación de Schrödinger? Este enigma crucial de la mecánica cuántica ha seguido siendo hasta hoy un asunto de peso y controvertido.

Cuando en física se describe algo de forma matemática, por lo común hay que describir dos cosas independientes:

1. Su estado en un momento determinado.
2. La ecuación que describa cómo cambiará ese estado con el paso del tiempo.

Por ejemplo, para describir la órbita de Mercurio alrededor del Sol, Newton especificó el estado de Mercurio mediante seis números: tres para la posición de su centro (digamos las coordenadas x, y, z) y tres para las componentes de la velocidad en esas direcciones[33]. Para la ecuación del movimiento recurrió a la ley de Newton: que la aceleración viene dada por el tirón gravitatorio hacia el Sol, el cual depende del inverso del cuadrado de la distancia al Sol.

En su modelo del átomo como sistema solar (figura 7.5, centro), Niels Bohr cambió la segunda parte de la descripción introduciendo saltos cuánticos entre órbitas especiales, pero mantuvo la primera parte. Schrödinger fue más radical aún, y cambió también la primera parte: ¡abandonó incluso la idea de que una partícula *tiene* una posición bien definida y una velocidad! En su lugar, describió el estado de una partícula mediante una bestia matemática nueva llamada *función de onda*, representada con el símbolo ψ, que describe en qué medida se encuentra una partícula en distintos lugares. La figura 7.5 (derecha) muestra el cuadrado[34] de la función de onda, $|\psi|^2$, del electrón de un átomo de hidrógeno en una órbita $n = 3$, y ahí se ve que en lugar de ocupar un lugar particular, parece estar repartido por igual en todo el entorno del protón, si bien prefiere ciertos radios frente a otros. La intensidad de la nube de electrones de la figura 7.5 (derecha) en diferentes lugares se corresponde con el grado en el que el electrón se encuentra en esos lugares. En concreto, si se busca el electrón de manera experimental, se ve que el cuadrado de la función de onda da la probabilidad de encontrarlo en distintos lugares, así que algunos físicos conciben la función de onda como la descripción de una *nube de probabilidad* o de una *onda de probabilidad*. En particular, nunca hallaremos una partícula en lugares donde su función de onda valga cero. Para animar un cóctel simulando saber mucho de física cuántica, otro término muy de moda que conviene mencionar es *superposición*, cuando una partícula está aquí y allí a la vez se dice que está en una superposición de aquí y allí, y su función de onda describe todo lo que hay que saber sobre esa superposición.

Estas ondas cuánticas son muy diferentes de las ondas clásicas de la figura 7.6: las olas normales sobre las que se practica surf consisten en agua, y lo que tiene forma ondulada es la superficie del agua, pero lo que está ondulado o en forma de nube en un átomo de hidrógeno no es el agua ni ningún tipo de sustancia en absoluto: lo único que hay ahí es un electrón independiente, y lo ondulado es su función de onda, es decir, en qué medida se encuentra repartido por diferentes lugares.



Figura 7.8: La función de onda ψ al borde del colapso.

El colapso del consenso

En resumen, Schrödinger trastocó la descripción clásica del mundo de dos maneras:

1. El *estado* no se describe mediante la posición y las velocidades de las partículas, sino a través de una función de onda.
2. El *cambio* que experimenta ese estado con el tiempo no se describe mediante las leyes de Newton o de Einstein, sino a través de la ecuación de Schrödinger.

Estos hallazgos de Schrödinger se han celebrado universalmente como algunos de los logros más relevantes del siglo XX, y revolucionaron tanto la

física como la química. Pero la confusión que generaron también llevó a muchos a rasgarse las vestiduras: si las cosas pueden estar en varios sitios al mismo tiempo ¿cómo es que nunca observamos eso (aunque sería lo lógico)? Este misterio acabó conociéndose como el *problema de la medida* (en física, *medida* y *observación* son sinónimos).

Tras mucho debate y discusión, Bohr y Heisenberg acordaron un remedio bastante extremo que se conoce como la *interpretación de Copenhague* y que hasta ahora se enseña y defiende en la mayoría de los manuales de mecánica cuántica. Una parte clave del mismo consiste en añadirle un rizo al segundo elemento mencionado, y postular que el cambio solo se rige por la ecuación de Schrödinger *durante una parte del tiempo*, dependiendo de si está teniendo lugar o no una *observación*. En concreto, si algo *no se está* observando, su función de onda cambia de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, pero si *se está* observando, entonces su función de onda *se colapsa*, y solo encontramos ese objeto en un único lugar. Este proceso de colapso es abrupto y esencialmente aleatorio, y la probabilidad de que encontremos la partícula en algún lugar concreto viene dada por el cuadrado de la función de onda. Por tanto, el colapso de la función de onda elimina convenientemente las superposiciones esquizofrénicas y explica el mundo clásico que nos es familiar y en el que vemos las cosas en un solo lugar cada vez. La tabla 7.3 reúne los principales conceptos cuánticos que hemos visto hasta ahora y la interrelación que mantienen entre sí.

La interpretación de Copenhague también introdujo otros elementos, pero los recién mencionados son los que gozan de mayor aceptación. Poco a poco he ido descubriendo que quienes defienden la interpretación de Copenhague como su favorita de la mecánica cuántica, suelen discrepar entre sí en relación con esos otros elementos, por lo que sería más adecuado hablar de las «interpretaciones de Copenhague». Roger Penrose, precursor de la relatividad, observó: «Probablemente hay más posturas distintas ante la mecánica cuántica que expertos en física cuántica. Esto no es nada incoherente, puesto que algunos físicos cuánticos defienden distintas concepciones al mismo tiempo». De hecho, hasta Bohr y Heisenberg tenían visiones ligeramente distintas sobre las implicaciones de todo ello en la naturaleza de la realidad. Sin embargo, todos los físicos de entonces admitieron que la interpretación de Copenhague funcionaba de maravilla por la sencilla razón de que les permitía seguir realizando sus tareas en el laboratorio como de costumbre.

Sin embargo, no todo el mundo quedó contento. Si el colapso de la función de onda ocurriera de verdad, entonces significaría que hay una aleatoriedad fundamental e inherente en las leyes de la naturaleza. A Einstein no le gustaba nada esta interpretación, y expresó su preferencia por un universo determinista mediante la citadísima declaración: «No puedo creer que Dios juegue a los dados». Al fin y al cabo, la mismísima esencia de la física había consistido en predecir el futuro a partir del presente, y ahora se daba por hecho que era imposible no solo en la práctica, sino también por principio. Ni siquiera alguien infinitamente sabio que conociera la función de onda de todo el universo podría calcular cuál sería la función de onda en el futuro, porque en cuanto alguien del universo efectuara una observación, la función de onda sufriría un cambio aleatorio.

Otro aspecto del colapso que causó consternación fue que la observación se elevara a la categoría de concepto crucial. Cuando Bohr proclamó «¡No hay realidad sin observación!», parecía devolver al ser humano al centro del universo. Después de que Copérnico, Darwin y otros desinflaran la soberbia humana y nos advirtieran sobre los riesgos de nuestra tendencia egocéntrica a pensar que todo gira a nuestro alrededor, la interpretación de Copenhague indujo a pensar que somos nosotros, los humanos, quienes en cierto modo creamos la realidad con solo mirarla.

Por último, a algunos físicos les molestaba la falta de rigor matemático. Mientras que los procesos físicos tradicionales se describían mediante ecuaciones matemáticas, la interpretación de Copenhague carecía de una ecuación para concretar qué constituía una observación, es decir, para especificar con exactitud cuándo se colapsaría la función de onda. ¿Era necesario un observador humano, o bastaba la consciencia en un sentido más amplio para colapsar la función de onda? Tal como lo expresó Einstein: «¿Existe la Luna por el simple hecho de que la mire un ratón?». ¿Puede un robot colapsar la función de onda? ¿Y una cámara web?

La rareza no se puede confinar

En términos generales, la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica sugiere que las cosas pequeñas actúan de forma extraña, pero las grandes no. Es decir, las cosas del tamaño de un átomo suelen estar en varios sitios a la vez, pero no ocurre así con las cosas grandes como la gente. Dejando a un lado las críticas recién mencionadas, la idea se sostiene en tanto

en cuanto la rareza permanezca confinada en el micromundo y no se filtre al macromundo, cual genio malvado confinado en una botella, incapaz de volverse grande y causar estragos. Pero ¿de verdad permanece confinada?

Una de las cosas que me incomodaron en aquella habitación de Estocolmo de la que hablaba al principio de este capítulo fue que las cosas grandes se componen de átomos, así que, como los átomos pueden estar en muchos sitios a la vez, las cosas grandes también podrán. Pero el mero hecho de poder no significa que lo hagan: cabría esperar que no existiera ningún proceso físico que amplificara la rareza microscópica en rareza macroscópica. El propio Schrödinger hizo añicos estas esperanzas con un experimento mental diabólico: el gato de Schrödinger está encerrado dentro de una caja con un bote de cianuro que se abrirá en cuanto decaiga un solo átomo radiactivo. Después de un tiempo, el átomo se encontrará en una superposición entre el decaimiento y el no decaimiento, lo que hará que todo el gato esté en una superposición entre la vida y la muerte. En otras palabras, una microsuperposición aparentemente inofensiva relacionada con un solo átomo se amplifica con el tiempo en una macrosuperposición donde un gato formado por miles de cuatrillones de partículas se halla en dos estados a la vez. Es más, esta amplificación de la rareza se da en todo momento, incluso sin artilugios sádicos. Seguramente habrá oído usted hablar de la teoría del caos: el modo en que las leyes de la física clásica pueden amplificar de manera exponencial alteraciones minúsculas, como que una mariposa de Pekín mueva el aire y acabe causando una tormenta en Estocolmo. Un ejemplo más simple lo ofrece un lápiz que se mantenga en equilibrio sobre la punta, donde un cambio microscópico en la inclinación inicial determinará la dirección en la que acabará cayendo. Siempre que intervienen dinámicas caóticas de este tipo, la posición inicial de un solo átomo puede decidir todo lo demás, de modo que si un átomo se halla en dos sitios a la vez, las cosas macroscópicas también acabarán en dos lugares a la vez.

Prontuario de mecánica cuántica	
Función de onda	Entidad matemática que describe el estado cuántico de un objeto. La función de onda de una partícula describe en qué medida se encuentra en sitios distintos
Superposición	Situación mecánico-cuántica en la que algo se encuentra en más de un estado al mismo tiempo, por ejemplo, en dos lugares diferentes
Ecuación de Schrödinger	Ecuación que permite predecir cómo cambiará la función de onda en el futuro
Espacio de Hilbert	Espacio matemático abstracto donde reside la función de onda
Colapso de la	Proceso aleatorio hipotético mediante el cual la función de onda sufre un cambio

función de onda	abrupto e incumple la ecuación de Schrödinger, lo que da a una medida un resultado determinado. La ausencia del colapso de la función de onda implica el multiverso del nivel III de Hugh Everett
Problema de la medida	La controversia acerca de lo que le sucede a la función de onda durante una medida cuántica: ¿se colapsa o no?
Interpretación de Copenhague	Conjunto de supuestos que admiten que la función de onda se colapsa durante las medidas
Interpretación de Everett	Aceptación de que la función de onda nunca se colapsa; implica el multiverso del nivel III (capítulo 8)
Decoherencia	Efecto de censura que se deriva de la ecuación de Schrödinger, por el cual las superposiciones se vuelven no observables a menos que sean secretas para el resto de mundo; hace que la función de onda parezca colapsarse durante las medidas incluso aunque en realidad no lo haga (capítulo 8)
Inmortalidad cuántica	La idea de que subjetivamente somos eternos si existe el multiverso del nivel III. Yo sospecho que no existe ninguna inmortalidad cuántica porque el continuo es una ilusión (capítulo 11)

Tabla 7.3: Guía de los principales conceptos de mecánica cuántica (el espacio de Hilbert y los tres últimos conceptos aparecerán en el próximo capítulo).

Esta amplificación de la rareza ocurre con claridad siempre que se efectúan observaciones cuánticas: si medimos la posición de un solo átomo que se encuentra en dos lugares al mismo tiempo**[35]** y anotamos el resultado en una hoja de papel, entonces la posición de la partícula determinará el movimiento de la mano y, por tanto, el lápiz acabará en dos lugares al mismo tiempo.

Por último, aunque no por ello menos importante, esa amplificación de la rareza se da con regularidad incluso dentro del cerebro. El hecho de que una neurona concreta se active en un instante determinado depende de si la suma de todas las señales que recibe supera cierto umbral, y eso torna muy inestables las redes neuronales, igual que la meteorología y el lápiz en equilibrio. Eso justamente es lo que ocurrió en la primera página de este libro, cuando yo me dirigía en bicicleta al colegio y me planteé si mirar o no hacia la derecha. Supongamos que la rápida decisión que tomé entonces fue tan precaria que dependió de si un único átomo de calcio entró, o no, en un enlace sináptico de la corteza prefrontal, para que una neurona concreta lanzara una señal eléctrica que desencadenara toda una cascada de actividad en otras neuronas del cerebro, y estas emitieran el mensaje conjunto: «*¡Mira!*». De modo que si el átomo de calcio partió de dos lugares ligeramente distintos a la vez, entonces medio segundo después yo dirigí las pupilas en dos direcciones opuestas al mismo tiempo, y poco después tuve todo el cuerpo en dos lugares diferentes a la vez, uno de ellos en la *morgue* para crear mi versión personal del experimento del gato de Schrödinger, en la que yo sustituía al gato…

Confusión cuántica

De modo que allí estaba yo, sumido en la frustración y el desconcierto en aquella habitación de estudiante que mi novia ocupaba en Estocolmo. Ahora ya sabe usted por qué. Se acercaba mi primer examen de física cuántica, y cuanto más reflexionaba sobre la interpretación de Copenhague que el libro de texto presentaba como una verdad evidente y absoluta, más inquieto me sentía. Estaba claro que la rareza cuántica no podía confinarse al micromundo. El gato de Schrödinger ya no estaba encerrado. Lo que me preocupaba entonces no era la rareza en sí, sino esto otro: imagine que realiza personalmente el experimento del gato de Schrödinger. Si el libro de texto estaba en lo cierto, entonces la función de onda del gato se colapsaría y el animal estaría definitivamente muerto o definitivamente vivo en el instante en que usted personalmente lo mirara. Pero ¿y si yo me quedo fuera del laboratorio en el que usted efectúa el experimento y considero la función de onda que describe todas las partículas que conforman el gato, a usted y todo lo demás contenido dentro del laboratorio? ¿Es seguro que todas esas partículas deberían regirse por la ecuación de Schrödinger con independencia de si forman parte de un ser vivo o no? Y en tal caso, las afirmaciones del libro implican que la función de onda del gato se colapsará únicamente cuando yo entre en el laboratorio y observe qué está ocurriendo, no en el instante previo en el que usted lo miró. Y entonces, antes de que yo mirara, también usted se hallaría en una superposición entre sentirse culpable por matar el gato y aliviado por que lograra sobrevivir. En otras palabras, en el mejor de los casos la interpretación de Copenhague era incompleta porque renunciaba a responder el interrogante de en qué momento preciso se colapsa la función de onda. En el peor de los casos, era incoherente, puesto que la función de onda de todo este universo jamás se colapsaría desde el punto de vista de alguien situado en un universo paralelo, desde el que jamás pudiera observarnos.

Por favor, acompáñeme en el siguiente capítulo para explorar qué nos dice en verdad la mecánica cuántica sobre la naturaleza de la realidad. Tal vez los suecos tengamos una predisposición genética a denostar a nuestros vecinos del suroeste, pero cuando reflexiono sobre la interpretación de Copenhague, no consigo quitarme de la cabeza esta cita de *Hamlet*: «Algo está podrido en el Estado de Dinamarca».

SUMARIO

- Todo, incluso la luz y la gente, parece estar formado por partículas.
- Estas partículas son objetos puramente matemáticos en el sentido de que las únicas propiedades intrínsecas que poseen son de carácter matemático, meros números con nombres como *carga*, *espín* y *número leptónico*.
- Estas partículas no obedecen a las leyes clásicas de la física.
- Desde un punto de vista matemático, el estado de estas partículas (que tal vez deberían llamarse «ondipartículas») no se puede describir mediante seis números (para representar su posición y velocidad), sino mediante una función de onda que describe en qué medida se encuentran en distintos lugares.
- Esto les confiere propiedades de las partículas tradicionales (pueden estar aquí o allí) y de las ondas (pueden estar en varios sitios a la vez en lo que se denomina una superposición).
- Las partículas no pueden estar en un único lugar (el principio de incertidumbre de Heisenberg), lo que impide que los átomos se colapsen.
- El comportamiento futuro de las partículas no se describe a través de las leyes de Newton, sino a través de la ecuación de Schrödinger.
- Esta ecuación revela que superposiciones microscópicas inofensivas pueden amplificarse en superposiciones macroscópicas demenciales como la del gato de Schrödinger, que harían que incluso usted pudiera estar en dos lugares a la vez.
- La formulación de los libros de texto postula que la función de onda a veces se «colapsa», lo que infringe la ecuación de Schrödinger e introduce una aleatoriedad esencial en la naturaleza.
- Los físicos debaten con ardor qué significa todo esto.
- La formulación de la mecánica cuántica que aparece en los libros de texto es o bien incompleta o bien incoherente.

8
El multiverso del nivel III

Cuando te encuentres un desvío en el camino, tómalo.

Yogi Berra

«¡Oh, qué preciosidad eso de ahí abajo!». La bahía de San Francisco brillaba al sol de atardecer, y me embargó un entusiasmo aún mayor que cuando mis padres me regalaron mi primer juego de magia. Me quedé pegado a la ventanilla para reconocer todos los lugares emblemáticos que estaba contemplando por primera vez en mi vida. Desde que ahorrara suficiente dinero vendiendo queso para irme en tren a España con diecisiete años, sucumbí cada vez más a los encantos de viajar. Desde que leí a Feynman en la facultad, me enamoré cada vez más de la física. Ahora, después de pasarme veintitrés años viviendo entre hielo y nieve, ¡tenía cuatro años por delante para hacer ambas cosas!, en un lugar que me parecía uno de los más fantásticos del planeta y un sitio perfecto para tener ideas descabelladas.

Me admitieron en la escuela de posgrado de física de Berkeley gracias a un gran golpe de suerte y, aunque acudí allí con unas expectativas que tal vez excedían con mucho lo razonable, aquellos cuatro años acabaron superándolas en todos los aspectos. Berkeley resultó ser un lugar tan inspirador, desenfrenado y demencial como esperaba. Al día siguiente de mi llegada me eché una novia australiana. Le vi ventajas al hecho de proceder de un país desconocido que la mayoría de la gente no sabía ni ubicar en el mapa: mi nacionalidad me permitía todas las locuras que quisiera. Me apodaron «Mad Max» y me salí con la mía: la gente me concedía el beneficio de la duda y daba por supuesto que ese era el comportamiento habitual de la gente en Suecia. Tampoco es que tuviera que justificarme. Un estudiante que acabó viviendo enfrente de mí solo iba a clase desnudo, y cuando lo expulsaron se convirtió en noticia nacional. Un compañero de clase de física con el que me reunía para resolver problemas que nos mandaban para casa trabajaba como actor porno para pagarse los estudios. Al tipo que vivía enfrente de mí en la

International House lo arrestaron por pillarlo con una pistola y una lista de nombres de «Gente a la que aniquilar»[36]. Así que, si lo más disparatado de ti era ser sueco y tener ideas descabelladas de física, encajabas a la perfección en aquel ambiente.

En mi época de estudiante de secundaria, mi amigo Magnus Bodin me había inspirado mucho con su filosofía a contracorriente. Como todo el mundo mandaba cartas en sobres rectangulares, él los confeccionaba triangulares. Desde entonces, siempre que la mayoría de la gente hace las cosas de una manera, yo busco alternativas de forma instintiva. Por ejemplo, todos mis compañeros de clase dedicaron un montón de tiempo a los deberes de electromagnetismo durante el primer año, así que hablé con el profesor para que me permitiera saltarme todo aquello a cambio de realizar un examen oral al final del curso. A diferencia del resto, pasé interminables horas en la biblioteca saciando mi curiosidad y ahondando en toda clase de asuntos físicos asombrosos que no aparecían en los libros de texto y que aún me sirven de ayuda en la actualidad. Aquello también me liberó para emprender investigaciones adicionales.

Por primera vez en mi vida hice amistades que compartían mi obsesión por las cuestiones físicas demenciales, y era fabuloso sentarse con aquellas almas gemelas hasta altas horas de la noche para especular sobre la naturaleza última de la realidad. Justin Bendich, cuya hechura desaliñada me recordaba a Shaggy de *Scooby-Doo*, era una mina de oro de información que daba respuestas reflexivas incluso a mis preguntas más disparatadas. Bill Poirier estaba obsesionado con la teoría de la información, y con él desarrollé un perfeccionamiento excelente del principio de incertidumbre de Heisenberg basado en la teoría de la información que nos entusiasmó en extremo hasta que encontré un artículo relacionado con el tema en la biblioteca. Me sentía la persona más afortunada del planeta: de verdad había descubierto a qué me quería dedicar, y lo estaba haciendo.

El multiverso del nivel III

Los nuevos profesores también eran estimulantes. Entendí a fondo la mecánica cuántica con Eugene Commins, cuyas ironías amenizaban las pizarras repletas de ecuaciones. Una vez levanté la mano para preguntar: «¿Eso no es como sumar peras con manzanas?», una expresión sueca muy habitual. «No», respondió, «es como sumar manzanas con naranjas».

Aunque su curso anual me enseñó numerosas herramientas técnicas útiles, jamás dio respuesta a mis interrogantes cuánticos más candentes. Es más, ni siquiera llegó a plantearlos, lo que me dejó atascado en una pelea en solitario contra ellos. ¿Era incoherente la mecánica cuántica? ¿De verdad se colapsaba la función de onda? De ser así, ¿cuándo lo hacía? Y, si no era así ¿por qué no veíamos objetos en dos lugares a la vez, y de dónde salían la aleatoriedad y las probabilidades de la mecánica cuántica?

Yo había oído que allá por 1957 el estudiante de posgrado de Princeton Hugh Everett III había propuesto una respuesta verdaderamente novedosa que implicaba universos paralelos, y sentí la curiosidad de conocer los detalles. Sin embargo, aquella idea solía ignorarse y rara vez se enseñaba. Aunque coincidí con algunas personas que habían oído hablar de ella, ninguna había leído la tesis doctoral en la que Everett la exponía, la cual yacía sepultada en un libro ya descatalogado. Lo único que había en la biblioteca era una versión muy abreviada donde en ningún momento se hacía mención explícita al asunto de los universos paralelos. Pero en noviembre de 1990, mis pesquisas dieron sus frutos, y al fin encontré aquella obra inaccesible. La hallé, como corresponde, en una tienda de Berkeley especializada en publicaciones raras donde también figuraban obras como *El libro de cocina del anarquista*.

La tesis doctoral de Everett me fascinó por completo. Sentí como si se me hubiera caído una venda de los ojos. ¡De repente todo cobró sentido! A Everett lo habían inquietado las mismas cosas que a mí, pero en lugar de quedarse ahí, siguió adelante, estudió posibles soluciones y descubrió algo extraordinario. Cuando se te ocurre una idea demasiado novedosa es fácil que te digas: «Seguro que no funcionará», y que la descartes. Pero si persistes en la idea un poco más, te planteas: «Bueno ¿y por qué razón exactamente no va a funcionar?», y reparas en que estás peleando por llegar a una respuesta sólida desde un punto de vista lógico, y entonces puede que estés sobre la pista de algo grande.

Y ¿cuál fue la idea revolucionaria de Everett? Pues fue un enunciado sumamente simple:

La función de onda nunca se colapsa. Jamás.

En otras palabras, la función de onda que describe por completo este universo cambia de manera determinista en todo momento, siempre regida por la ecuación de Schrödinger, con independencia de si se están efectuando observaciones o no. De modo que la ecuación de Schrödinger impera

totalmente, sin condiciones, añadiduras ni objeciones de ninguna clase. Esto significa que podemos concebir la teoría de Everett como una «Mecánica Cuántica Simplificada»: se parte de la versión de la teoría habitual en los libros de texto y se elimina el postulado que habla del colapso de la función de onda y de las probabilidades.

Aquello me sorprendió mucho, porque los rumores que había oído sugerían que Everett había postulado rarezas tales como universos paralelos y que nuestro universo se dividiría en dos universos paralelos en cuanto realizáramos una observación. Es más, incluso hoy muchos de mis colegas físicos siguen pensando que eso es lo que propuso Everett. La lectura del libro de Everett me enseñó una lección no solo de física, sino también de sociología: aprendí la importancia de acudir a las fuentes originales y consultarlas por uno mismo en lugar de fiarse de informaciones de segunda mano. No solo en política se cita mal, se tergiversa y se deforma lo que dice la gente, y la tesis de Everett constituye un buen ejemplo de algo sobre lo que, de entrada, todo el mundo en física tiene una opinión, aunque casi nadie la ha leído[37].

Yo no pude dejar de leer el libro. Su lógica era preciosa: no daba por supuesto nada descabellado, sino que ¡todo surgía como consecuencia de su conjetura! Al principio parecía demasiado simple para que funcionara. Al fin y al cabo, Niels Bohr y sus colaboradores eran personas inteligentes y habían inventado el colapso de la función de onda por una razón, para explicar por qué los experimentos parecían arrojar resultados inequívocos bien definidos. Pero Everett reparó en algo sorprendente: aunque los experimentos no dieran resultados inequívocos y bien definidos, ¡aun así seguiría *pareciendo* que sí lo hacen!

La figura 8.1 muestra un ejemplo de cómo lo entiendo yo. En este experimento mental que he bautizado como «naipes cuánticos» usted elige una carta con un borde inferior perfectamente afilado y regular, la coloca en equilibrio sobre una mesa y se apuesta 100 dólares a que se volcará mostrando el anverso. Usted cierra los ojos hasta que la oiga caer y entonces los abre para comprobar si ha ganado o perdido la apuesta. Según la física clásica, la carta en principio permanecerá en equilibrio para siempre[38]. De acuerdo con la ecuación de Schrödinger, caerá en cuestión de segundos por mucho que nos esforcemos por equilibrarla, porque el principio de incertidumbre de Heisenberg establece que no puede estar en una sola posición (de pie) sin moverse. Pero, como el estado inicial era simétrico a

izquierda y derecha, el estado final deberá serlo también. Esto implica que caerá en ambas direcciones al mismo tiempo, en superposición.

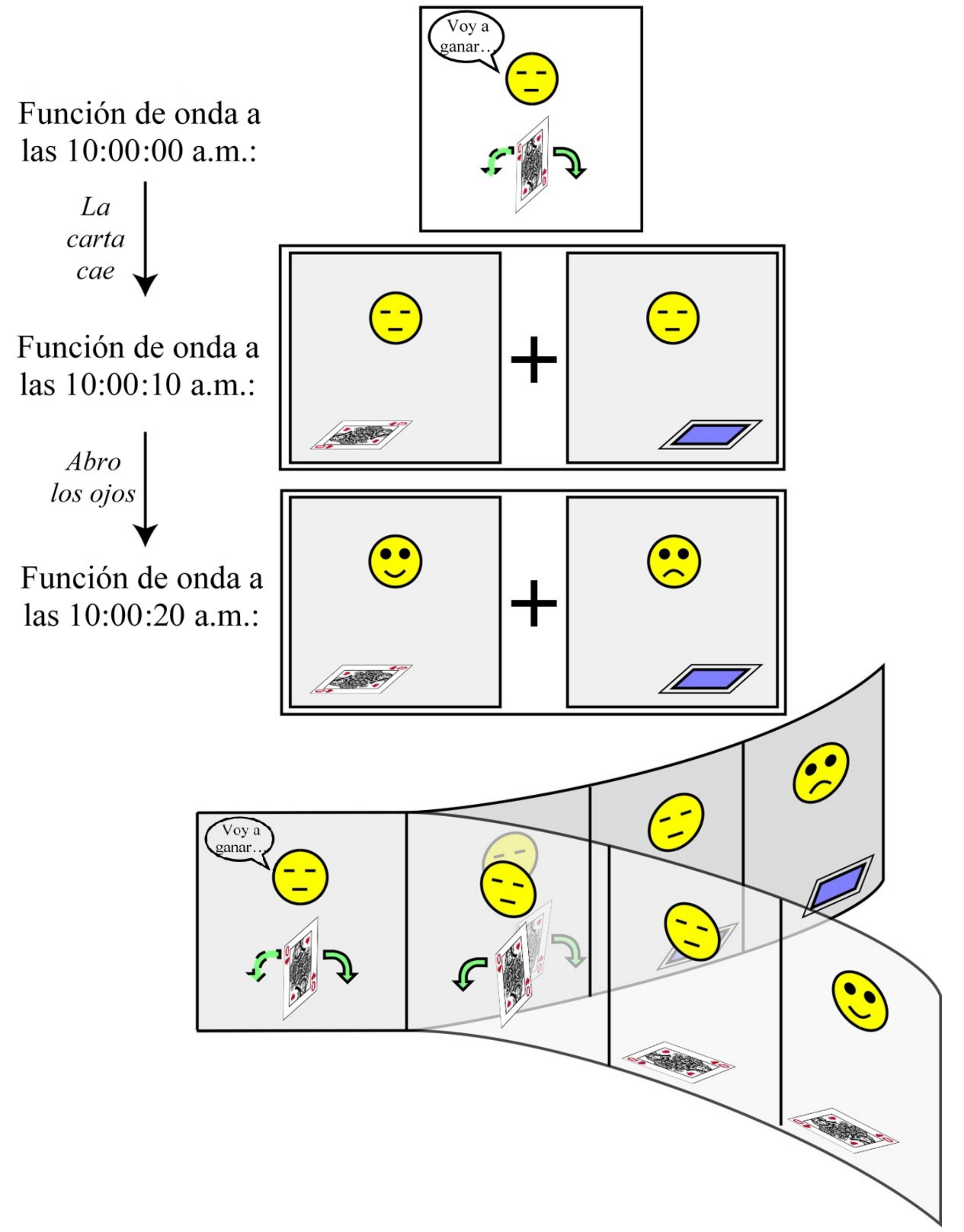


Figura 8.1: El experimento mental de los naipes cuánticos: A las 10:00 pongo una carta en equilibrio sobre su borde, apuesto 100 dólares a que caerá boca arriba y cierro los ojos. Diez segundos después, la carta se precipita al suelo tanto por el lado de la izquierda como por el de la derecha en una superposición cuántica, así que la función de onda describe que la carta está en dos lugares a la vez. Otros diez segundos después, abro los ojos y miro la carta, así que la función de onda describe que estoy feliz y triste al mismo tiempo. Aunque aún hay una sola función de onda y una realidad cuántica (dentro de la cual las partículas que conforman tanto al naipe como a mí están en dos lugares a la vez), Everett reparó en que, en la práctica, eso es como si nuestro universo se dividiera en dos universos paralelos (abajo) con un resultado inequívoco y bien definido en cada uno de ellos.

Al abrir los ojos y mirar la carta, estaríamos efectuando una observación. Así, según la interpretación de Copenhague, la función de onda se colapsaría y veríamos la carta o bien del derecho o bien del revés, con un 50 % de probabilidades para cada resultado. Usted se alegraría por la facilidad con que ganó o se maldeciría por haberse dejado engañar y haber malgastado 100 pavos en un estúpido experimento de física, y las leyes de la física no habrían podido predecir ninguno de esos estados, porque estarían causados por la aleatoriedad inherente a la naturaleza. Pero ¿y según Everett? Bueno, para él no hubo nada mágico en relación con la observación: tan solo se trató de un proceso físico como cualquier otro, si bien caracterizado por una transferencia de información (en este caso, del naipe al cerebro). Si la función de onda hubiera descrito que la carta solo caería boca arriba, usted se habría alegrado, y viceversa. La combinación de estos factores con la ecuación de Schrödinger le permitiría calcular con facilidad y exactitud qué ocurriría con la función de onda: pasaría a describir una superposición de dos configuraciones distintas en las partículas que conforman tanto a usted como al naipe: una en la que la carta cayó del derecho y usted estaba feliz, y otra en la que cayó del revés y usted se llevó un chasco. Aquí hay tres ideas cruciales:

1. El experimento lo coloca a usted en dos estados mentales a la vez. Básicamente se trata de una versión no letal del experimento del gato de Schrödinger, donde usted representa el papel del gato.
2. Cada uno de esos dos estados mentales no tiene ningún conocimiento del otro.
3. Cada estado mental queda conectado con el estado de la carta de tal modo que todo mantiene la coherencia. (La función de onda no describe ninguna configuración de partículas en la que suceda que la carta está boca abajo pero usted la percibe boca arriba).

Es fácil demostrar que la ecuación de Schrödinger siempre mantiene de este modo la coherencia entre las cosas. Por ejemplo, si un amigo sin blanca entra en la estancia y le pregunta qué pasa, el estado de todas las partículas (las que conforman la carta, a usted y a su amigo) evoluciona hacia una superposición cuántica de «carta boca abajo/usted triste/empatía de su amigo» y «carta boca arriba/usted feliz/su amigo le pide un préstamo».

Al juntar todo esto, tal como se ilustra en la figura 8.1, Everett reparó en que, aunque siga habiendo una sola función de onda y una sola realidad cuántica (dentro de la cual muchas de las partículas que conforman este universo se encuentran en dos sitios a la vez), en la práctica es ¡como si el

universo se hubiera dividido en dos universos paralelos! Al final de este experimento habrá dos versiones distintas de usted, cada una con sensaciones subjetivas tan reales como la otra, pero absolutamente inconscientes de la existencia de la otra.

Ahí fue donde la mente empezó a darme vueltas de verdad, porque el experimento de las cartas cuánticas no es más que un ejemplo concreto de la manera en que la rareza cuántica microscópica se amplifica en rareza cuántica macroscópica. Tal como comentamos en el capítulo anterior, dicha amplificación de pequeñas alteraciones en grandes alteraciones se da prácticamente en todo momento, como cuando el impacto de una partícula de un rayo cósmico induce o no induce en alguien una mutación cancerosa, cuando las condiciones atmosféricas de hoy derivan o no derivan en un huracán de categoría 4 el año próximo, o cuando usamos las neuronas para tomar decisiones. En otras palabras, el desdoblamiento en universos paralelos ocurre sin cesar, así que el número de universos paralelos cuánticos da vértigo. Como ese desdoblamiento se ha venido produciendo desde nuestra Gran Explosión, casi cualquier versión de la historia que se pueda imaginar habrá sucedido de verdad en un universo paralelo cuántico, siempre y cuando no infrinja ninguna ley física. Esto da lugar a muchos más universos paralelos que granos de arena contiene nuestro universo. Resumiendo, Everett demostró que si la función de onda nunca se colapsa, entonces la realidad que percibimos y con la que estamos familiarizados no es más que la punta de un iceberg ontológico que constituye una parte reducidísima de la verdadera realidad cuántica.

Como recordará, también nos topamos con universos paralelos en el capítulo 6, pero eran de otro tipo. Para evitar confusiones con una sobredosis de universos paralelos, repasemos la terminología que acordamos en el capítulo 6. Con *este universo* (o *nuestro universo)* aludimos a la región esférica del espacio desde donde la luz ha tenido tiempo de alcanzarnos durante los catorce mil millones de años transcurridos desde la Gran Explosión, junto con las propiedades clásicas observadas en él (qué galaxias están en qué lugar, lo que figura en los libros de historia, etc.). En el capítulo 6 denominamos *universos paralelos del nivel lo universos paralelos del nivel II* a otras regiones esféricas similares muy lejanas dentro de nuestro espacio enorme o infinito, dependiendo de si en ellas rigen o no nuestras mismas leyes físicas efectivas. Ahora llamaremos *universos paralelos del nivel III* a los universos cuánticos paralelos que descubrió Everett, y al conjunto de todos ellos lo denominaremos *multiverso del nivel III* ¿Y dónde

residen esos universos paralelos? Mientras que los del nivel I y el nivel II se encuentran muy distantes dentro de nuestro querido espacio tridimensional, los del nivel III bien podrían estar aquí mismo, en lo que respecta a esas tres dimensiones, pero separados de nosotros en lo que los matemáticos denominan el *espacio de Hilbert*, un espacio abstracto con una cantidad infinita de dimensiones donde habita la función de onda[39].

Tras pasar una década en el olvido y casi ignorada por completo, la versión de la mecánica cuántica de Everett empezó a ganar popularidad gracias al célebre teórico de la gravitación cuántica Bryce DeWitt, quien la llamó la interpretación de la pluralidad de mundos, un nombre que perduró. Cuando con posterioridad coincidí con Bryce, me contó que al principio le había planteado a Hugh Everett la queja de que le gustaban sus matemáticas, pero lo incomodaba mucho no *notar* que se estuviera dividiendo constantemente en versiones paralelas de sí mismo. A lo que, según me contó, Everett respondió con una pregunta: «¿Acaso notas que órbitas alrededor del Sol a 30 kilómetros por segundo?». *«Touché!»*, había exclamado Bryce, y en el acto reconoció su derrota. De igual modo que la física clásica predice que giramos a gran velocidad alrededor del Sol y que no lo notamos, Everett reveló que la física cuántica sin colapso predice que nos estamos dividiendo y que no lo notamos.

A veces me cuesta mucho compaginar lo que creo con lo que siento. En mayo de 1999 espero la llegada de la cigüeña con mi primer hijo. Aguardo ansioso y confío en que el parto acabe bien. Pero al mismo tiempo, los cálculos físicos me han convencido de que acabará tanto bien como mal en diferentes universos paralelos. Y en ese caso, ¿qué quiero decir con que confío? ¿Me refiero quizá a que confío en que yo acabe estando en uno de esos universos paralelos donde todo vaya bien? No, eso no tiene sentido porque yo acabaré en todos esos universos paralelos, y estaré exultante en unos, y desolado en otros. Mmm. ¿Quizá me refiero a que confío en que el parto salga bien en la mayoría de los universos paralelos? No, eso tampoco tiene ningún sentido, ya que el porcentaje de universos donde todo saldrá bien se puede calcular mediante la ecuación de Schrödinger, y es ilógico abrigar esperanzas sobre algo que ya está predeterminado. Pero, bueno, al parecer (y quizá también por suerte) mis emociones no siempre son lógicas.

El espejismo de la aleatoriedad

Pero aún me quedaban más dudas. Ya se sabía que si se repite un experimento cuántico muchas veces, lo normal es obtener distintos resultados aparentemente al azar: por ejemplo, al medir la dirección del espín de un montón de átomos preparados de forma idéntica, se puede obtener una secuencia aparentemente aleatoria de resultados como, por ejemplo, dextrógira, levógira, dextrógira, dextrógira, levógira, etc. La mecánica cuántica no predice los resultados, sino tan solo la probabilidad de que salgan los distintos resultados. Pero todo este asunto de la probabilidad formaba parte del postulado del colapso procedente de la interpretación de Copenhague, de modo que cuando Everett lo eliminó ¿cómo iba a predecir la mecánica cuántica nada aleatorio? No hay nada de aleatorio en la ecuación de Schrödinger: si se conoce la función de onda de nuestro universo en este instante, en principio se podría predecir cuál será la función de onda en cualquier instante del futuro.

En el otoño de 1991 me apunté a un insólito curso sobre la interpretación de la mecánica cuántica que impartía un compañero también estudiante de posgrado llamado Andy Elby. Su habitación en la residencia solía quedar cerca de la de mi novia, y la puerta estaba adornada con consejos útiles como: «Siete pasos sencillos para dejar las cosas para después». Igual que a mí, le interesaba mucho el verdadero significado de la mecánica cuántica, y dentro de aquel curso me permitió impartir dos clases sobre el trabajo de Everett. Para mí fue un emocionante rito de paso, porque era la primera vez que daba una charla sobre física, y gran parte de ella trató sobre cómo explicaba Everett la aleatoriedad. En primer lugar, si usted realiza el experimento de los naipes cuánticos (figura 8.1), las dos copias de usted que habrá después del mismo (cada una en un universo paralelo diferente) verán un resultado bien definido e inequívoco. Ambas percibirán que el resultado fue aleatorio, en tanto en cuanto no había manera de predecirlo: por cada posible resultado, ocurrió también el resultado contrario en un universo igual de real. Entonces, ¿qué hay de las probabilidades? ¿De dónde salen? Bueno, si usted repite el experimento con cuatro naipes, obtendrá 24 = 16 resultados (figura 8.2), y en la mayoría de esos casos, le parecerá que las reinas caen al azar con casi un 50 % de probabilidades. Solo en 2 de los 16 casos las cuatro cartas caerán del mismo lado. Cuanto más repita el experimento, más interesante se pondrá el asunto. De acuerdo con un teorema de 1909 del matemático francés Emile Borel, usted verá reinas el 50 % del tiempo en casi todos los casos (en todos ellos excepto en lo que los matemáticos denominan un conjunto de medida nula) si usted repite el experimento de los naipes una cantidad infinita de

veces. Casi todas las copias que haya de usted en la superposición final concluirán, pues, que imperan las leyes de la probabilidad, aun cuando la física subyacente (la ecuación de Schrödinger) no sea aleatoria en absoluto.

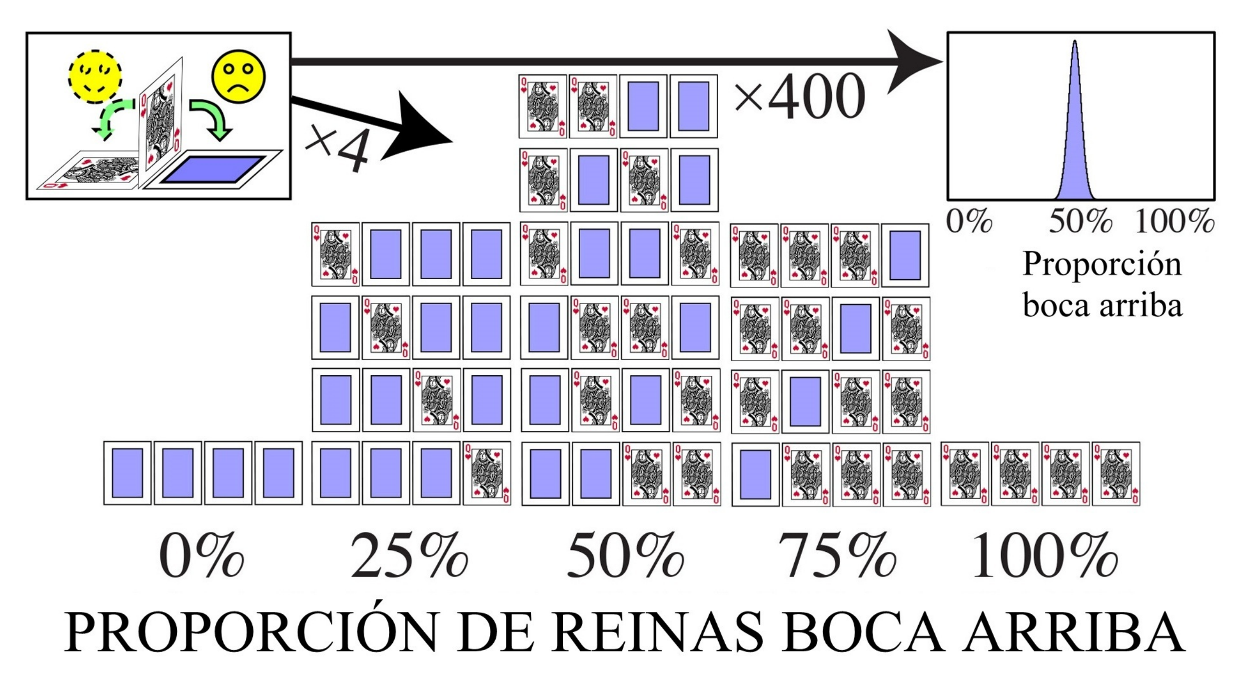


Figura 8.2: El origen de las probabilidades cuánticas. De acuerdo con la física cuántica, un naipe perfectamente equilibrado sobre su borde caerá, por simetría, de ambos lados a la vez, en lo que se conoce como una superposición. Si usted se apuesta algo a que la reina caerá boca arriba, el estado del mundo se convertirá en una superposición de dos resultados: usted sonriente con la carta de la reina del derecho, y usted con el ceño fruncido y la carta de la reina del revés. En ambos casos usted ignorará el otro resultado y le parecerá que la carta cayó al azar. Si repitiera el experimento con cuatro naipes, se producirían 2 × 2 × 2 × 2 = 16 resultados (véase la figura). En la mayoría de estos casos le parecería que la reina cae al azar, con un porcentaje aproximado del 50 %. Solo en 2 de los 16 casos obtendría usted el mismo resultado para las cuatro cartas. Si repitiera el experimento 400 veces, la mayoría de los 2400 resultados mostrarían alrededor de un 50 % de reinas (boca arriba). Según un conocido teorema, usted obtendría reinas el 50 % del tiempo en casi todos los casos si se considera el límite donde se repite el experimento con los naipes un número infinito de veces. De modo que casi todas las copias que haya de usted en la superposición final llegarán a la conclusión de que rigen las leyes de la probabilidad, aunque la física subyacente no sea aleatoria y, tal como dijo Einstein, «Dios no juega a los dados».

En otras palabras, la percepción subjetiva que tendrá una copia de usted en un universo paralelo *normal* será una secuencia aparentemente aleatoria de éxitos y fracasos que se comporta como si estuviera generada mediante un proceso aleatorio con una probabilidad del 50 % para cada resultado. Este experimento se puede llevar a cabo de un modo más riguroso si se anota en un papel un «1» cada vez que se gana y un «0» cada vez que se pierde, precedidos de una coma decimal. Por ejemplo, si pierde, pierde, gana, pierde, gana, gana, gana, pierde, pierde y gana, tendrá que escribir «,0010111001». Pero ese es el aspecto que presentan justamente los números reales que median entre el cero y el uno al escribirlos en código binario, ¡tal como los

escriben los ordenadores en el disco duro! Si imaginamos que usted repite el experimento de los naipes cuánticos una cantidad infinita de veces, acabará con una cantidad infinita de dígitos anotados en la hoja de papel, así que podrá asignar a cada universo paralelo un número entre 0 y 1. Pues bien, lo que demuestra el teorema de Borel es que el 50 % de los decimales de casi todos esos números es un 0 y el otro 50 % es un 1, y eso significa que en casi todos los universos paralelos ha ganado el 50 % del tiempo y ha perdido el 50 % del tiempo**[40]**. No es solo que los porcentajes salgan bien. El 50 % de los dígitos del número «,010101010101…» es 0, pero está claro que no es aleatorio, ya que sigue un patrón simple. El teorema de Borel se puede generalizar para mostrar que casi todos los números tienen dígitos de apariencia aleatoria sin ningún patrón en absoluto. Esto significa que en casi todos los universos paralelos del nivel III, la secuencia de nuestros éxitos y fracasos también será absolutamente aleatoria, sin ningún patrón, de modo que lo único predecible es que ganaremos el 50 % de las veces.

Cada vez me chocaba más que esta ilusión del asunto de la aleatoriedad en realidad no fuera específica en absoluto de la mecánica cuántica. Supongamos que alguna tecnología futura permitiera clonar personas mientras duermen, y que dos copias de usted se ubican en sendas habitaciones numeradas con 0 y 1 (figura 8.3). Cuando despierten, ambas copias sentirán que el número que leen en la estancia es totalmente impredecible y aleatorio. Si en un futuro usted pudiera transferir la mente a un ordenador, entonces lo que estoy comentando aquí le parecería obvio e intuitivo, puesto que la clonación en tal caso sería tan fácil como copiar un programa. Si se repitiera entonces el experimento de la figura 8.3 muchas veces, y cada una de esas veces se anotara el número de la habitación, en casi todos los casos la secuencia de ceros y unos anotada parecería aleatoria, y constarían ceros alrededor del 50 % de las veces.

En otras palabras, la física causal inducirá una ilusión de aleatoriedad a partir de su percepción subjetiva en cualquier circunstancia en la que usted sea clonado. La razón fundamental de que la mecánica cuántica parezca aleatoria a pesar de que la función de onda evoluciona de manera determinista estriba en que la ecuación de Schrödinger puede hacer que una función de onda con un solo usted se transforme en otra con clones de usted emplazados en universos paralelos.

Entonces, ¿qué percibe usted cuando lo clonan? ¡Percibe aleatoriedad! Y cada vez que a usted parece ocurrirle algo fundamentalmente aleatorio, algo

que no habría sido posible predecir ni siquiera en teoría, en realidad es un signo de que usted ha sido clonado.

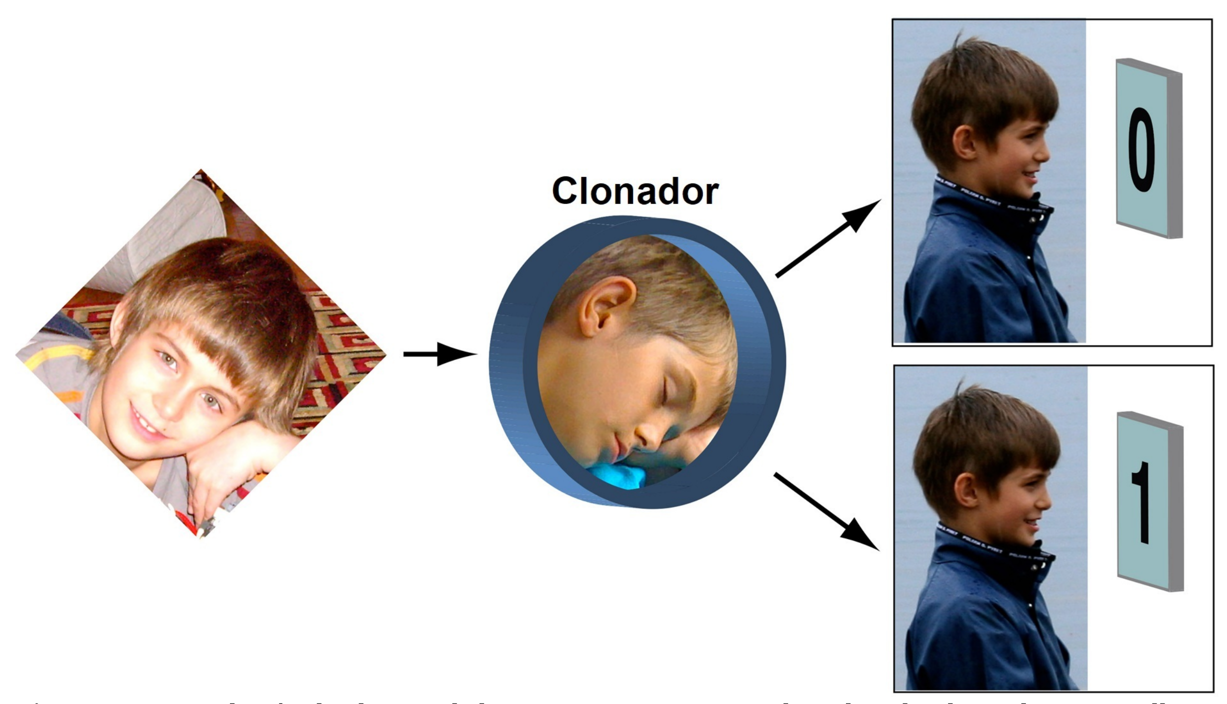


Figura 8.3: La ilusión de aleatoriedad ocurre siempre que usted es clonado, de modo que en ella no hay nada específico de la mecánica cuántica. Si alguna tecnología futura permitiera clonar a mi hijo Philip mientras duerme, y sus dos copias se colocaran en estancias numeradas con 0 y 1, ambas percibirían al despertar que el número que leen en la habitación es totalmente impredecible y aleatorio.

El trabajo de Hugh Everett sigue siendo controvertido, pero creo que estaba en lo cierto y que la función de onda nunca se colapsa. También creo que algún día será reconocido como un genio a la altura de Newton y Einstein, al menos en la mayoría de universos paralelos. Por desgracia, en este universo nuestro su obra se ha despreciado e ignorado durante más de una década. No consiguió trabajo en el ámbito de la física, se volvió bastante hosco e introvertido, fumaba y bebía demasiado, y murió joven de un ataque al corazón en 1982. Recientemente he sabido más sobre él porque conocí a su hijo, Mark, durante la grabación de un documental televisivo titulado *Parallel Worlds, Parallel Lives* [Mundos paralelos, vidas paralelas]. El productor me pidió que le explicara el trabajo de su padre, y me sentí muy afortunado y honrado: cuando visité aquella librería de Berkeley especializada en rarezas no imaginé ni por asomo que algún día establecería este contacto personal con uno de mis superhéroes físicos. Mark es una estrella de *rock*, y quien haya visto *Shrek* lo ha oído cantar. La suerte de su padre supuso un tormento para toda la familia, y se aprecia en muchas de sus canciones. Él y su hermana apenas se relacionaron con su padre, a pesar de que vivían juntos. Su hermana

se suicidó y dejó una nota diciendo que se iba a visitar a su padre en un universo paralelo.

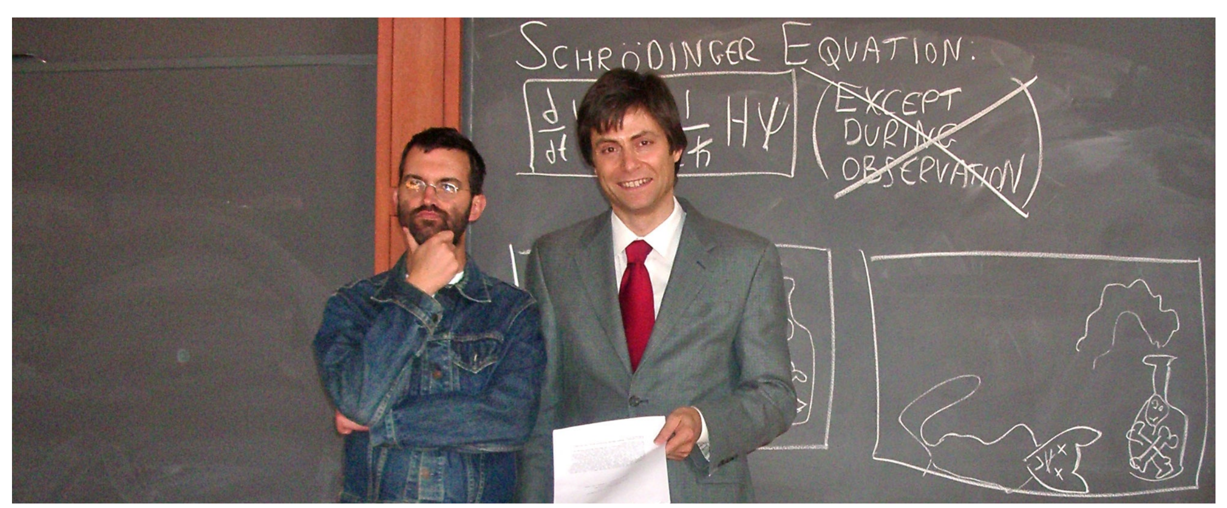


Figura 8.4: Mark, hijo de Hugh Everett y estrella de *rock*, reflexionando conmigo sobre la teoría de su padre en 2007.

Como creo en la existencia de los universos paralelos de Hugh Everett, no puedo evitar imaginar cómo son. En nuestro universo, lo rechazaron en la escuela de posgrado del Departamento de Física de Princeton, ingresó en el Departamento de Matemáticas y se trasladó al de Física un año después. Dadas sus limitaciones de tiempo, sus estudios cuánticos fueron los únicos que desarrolló. Creo que en muchos otros universos lo admitieron en el Departamento de Física de Princeton desde un principio, y que tuvo tiempo de hacer historia con otros estudios convencionales, por lo que fue más difícil que sus ideas cuánticas ulteriores cayeran en el olvido. Eso lo lanzó hacia una trayectoria profesional parecida a la de Einstein, cuya teoría especial de la relatividad también se enfrentó a recelos iniciales (sobre todo por proceder de un tipo que trabajaba fuera del mundo académico como empleado de una oficina de patentes) aunque nadie la pudo ignorar, porque Einstein ya se había labrado un nombre con descubrimientos previos. Igual que Einstein se quedó en el mundo académico y descubrió la relatividad general, también Everett consiguió la estabilidad de una cátedra y alcanzó otros logros tan notables como el primero: ¡Ay, cómo me intriga saber qué descubrió…!

Un acontecimiento que a Everett le habría encantado ocurrió a finales de agosto de 2001, en la casa de Martin Rees de Cambridge, donde este reunió a muchos de los físicos más destacados del mundo para celebrar un encuentro informal sobre universos paralelos y temas afines. Por lo que sé, era la primera vez que los universos paralelos empezaban a considerarse respetables en el mundo de la ciencia (aunque aún fueran controvertidos). Creo que

muchos participantes dejaron de sentirse culpables y abochornados por interesarse por estas cosas al ver al resto de los asistentes, y bromeaban diciendo cosas como «Anda… ¿qué haces tú en un encuentro tan cuestionable como este?…». Durante un debate colectivo largo e intenso, de pronto reparé en que parte de la discordia se debía a meros malentendidos basados en el empleo de un lenguaje tosco: ¡diferentes personas usaban el término universo paralelo para referirse a diversas ideas bastante diferentes! *Un momento,* pensé, *¡hay dos —no, tres— clases distintas! ¡No, cuatro!* Después de meditarlo con calma, levanté la mano y propuse el esquema de clasificación de multiversos de cuatro niveles que estoy usando en este libro.

A pesar de su brillantez, la tesis de Everett dejaba una cuestión importante sin responder: si es cierto que un objeto grande puede estar en dos sitios a la vez, ¿cómo es que nunca observamos eso? Sin duda, si se mide la posición de las dos copias de usted en los dos universos paralelos resultantes, cada una de ellas ocupará un lugar definido e inequívoco. Pero esa respuesta no es lo bastante satisfactoria, porque meticulosos experimentos revelan que los objetos grandes *nunca* se comportan como si estuvieran en dos lugares a la vez, ni siquiera cuando nadie los mira. En particular, nunca exhiben propiedades ondulatorias que sigan los llamados patrones de interferencias cuánticas. No solo la tesis de Everett carecía de una respuesta para este misterio, sino que en mis libros de texto tampoco encontraba una.

Censura cuántica

¡Toma ya!¡¡¡Funciona!!! Es finales de noviembre de 1991 en Berkeley, fuera está oscuro y yo garabateo con frenesí símbolos matemáticos sobre una hoja de papel en el escritorio de casa. Me recorrió una oleada de entusiasmo diferente a cualquier otra de las que había sentido antes. ¡Caramba! ¿Será verdad que yo, minúscula irrelevancia, acabo de descubrir algo realmente importante? Tengo que averiguarlo.

Creo que a menudo lo más difícil en ciencia no es llegar a la respuesta correcta, sino dar con la pregunta adecuada. Si te topas con un interrogante físico verdaderamente interesante y bien formulado, puede cobrar vida propia y transmitirte de forma automática qué cálculos hay que hacer para responderlo, y el resto vendrá casi solo: aunque las matemáticas te lleven horas o días, es como tirar de un sedal hasta ver qué has pescado. Yo me tropecé con uno de esos afortunados interrogantes.

Sabía que la cuestión del colapso de la función de onda se podía resumir con elegancia en términos matemáticos mediante una tabla de números llamada *matriz de densidad* en la jerga de la física cuántica, la cual representa no solo el estado de algo (su función de onda), sino también el conocimiento tal vez incompleto de la función de onda[41]. Por ejemplo, si algo solo puede estar en dos lugares diferentes, mi conocimiento de ello se puede describir mediante una tabla de números dos a dos, como en estos dos ejemplos:

$$\begin{pmatrix} 0{,}5 & 0{,}5 \\ 0{,}5 & 0{,}5 \end{pmatrix} = \text{«Está aquí y allí a la vez».}$$

$$\begin{pmatrix} 0{,}5 & 0 \\ 0 & 0{,}5 \end{pmatrix} = \text{«Está aquí, o está allí, pero no sé en cuál de los dos lugares».}$$

En ambos casos, la probabilidad de que lo encuentre en cualquiera de los dos sitios es 0,5, y eso aparece representado mediante los dos números situados en la diagonal en cada matriz (el 0,5 del extremo superior izquierdo y el 0,5 del extremo inferior derecho). Los otros dos números de cada tabla, «los elementos fuera de la diagonal de la matriz de densidad», tal como los llamamos enjerga técnica, representan la diferencia entre la incertidumbre cuántica y la clásica: cuando también ellos equivalen a 0,5, tenemos ante nosotros una superposición cuántica (digamos que el gato de Schrödinger está vivo y muerto), pero cuando valen cero, nos encontramos a todos los efectos ante la vieja incertidumbre clásica, como cuando no recordamos dónde están las llaves. De modo que si conseguimos sustituir esos números fuera de la diagonal por ceros, entonces transformaremos la *y* en *0,* ¡y colapsaremos la función de onda!

Como vimos en el capítulo anterior, la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica dice que si una amiga suya observa el objeto sin decirle el resultado, entonces ella colapsará la función de onda de tal modo que el objeto estará o aquí o allí, y usted sencillamente no sabrá en cuál de los dos lugares se encuentra. En otras palabras, la interpretación de Copenhague dice que una observación transforma de algún modo en ceros esos números fuera de la diagonal. Yo me pregunté si habría algún proceso físico menos misterioso que lograra eso mismo. Si se dispone de un sistema aislado que no interacciona con nada más, es fácil demostrar mediante la ecuación de Schrödinger que esos números molestos nunca desaparecerán. Pero los sistemas reales casi nunca están aislados, y me planteé qué efecto tendría eso. Por ejemplo, mientras usted lee esta frase, hay moléculas del aire y fotones

chocando constantemente contra usted. De modo que si algo está en dos sitios a la vez, ¿qué ocurre con la tabla de números dos a dos que lo describe cuando algo más rebota contra el objeto?

Esta fue una de esas fantásticas preguntas que se responden solas, y el resto llegó de forma automática. Sencillamente, consideré el objeto y las partículas incidentes como un único sistema aislado, y usé la ecuación de Schrödinger para calcular qué sucedería. Un par de horas después, me vi sentado frente a páginas repletas de símbolos matemáticos y exhausto: los números fuera de la diagonal pasaron a valores muy cercanos a cero, ¡como si la función de onda se hubiera colapsado! *En realidad* no se había colapsado, por supuesto, y esos universos paralelos seguían sanos y salvos, solo que había un efecto nuevo que parecía el colapso de la función de onda, olía a colapso de función de onda y que, igual que un verdadero colapso, impedía observar el objeto en dos lugares a la vez. Así que la rareza cuántica no desaparece, sino que tan solo ¡queda censurada!

Concluí que la mecánica cuántica tiende al secreto: un objeto solo estará en dos lugares a la vez en una superposición cuántica mientras su ubicación se mantenga en secreto ante el resto del mundo. Si el secreto se desvela, todos los efectos de la superposición cuántica se vuelven inobservables, y a todos los efectos prácticos es como si estuviera aquí o allí, y nosotros simplemente no supiéramos en cuál de los dos sitios está. Si un técnico de laboratorio mide la posición y la anota, es evidente que la información sale a la luz. Pero la información de su posición también trasciende si un solo fotón rebota contra el objeto en cuestión: porque queda codificada en la posición subsiguiente del fotón. Tal como se ve en la figura 8.5, un nanosegundo después el fotón estará en uno de dos lugares muy diferentes dependiendo de la posición del objeto en sí, así que midiendo la ubicación del fotón se descubre la posición del espejo.

Al principio del capítulo anterior planteé si haría falta un observador humano para colapsar la función de onda, o si bastaría un robot. Ahora estaba convencido de que la consciencia no tenía nada que ver con todo el asunto, porque hasta una sola partícula podía obrar el prodigio: el rebote de un solo fotón contra un objeto ejercía el mismo efecto que su observación por parte de una persona. Me di cuenta de que la observación cuántica no guarda relación con la consciencia, sino tan solo con la transferencia de información. Por último comprendí por qué nunca vemos objetos macroscópicos en dos sitios a la vez aunque estén en dos sitios a la vez: no es porque sean grandes, sino porque ¡son difíciles de aislar! Una pelota de jugar a los bolos al aire libre

recibe el impacto de unos 10^{20} fotones y 10^{27} moléculas de aire por segundo. Por definición, a mí me resulta imposible ver algo que no reciba el impacto de fotones, puesto que solo veo las cosas cuando contra ellas inciden fotones (luz), así que la superposición cuántica de una pelota de bolera que esté en dos lugares a la vez desaparecerá antes incluso de que yo tenga oportunidad de darme cuenta de ella. En cambio, si retiramos la mayor cantidad posible de moléculas de aire con una buena bomba de vacío, un electrón sobrevivirá por lo común durante alrededor de un segundo sin chocar contra nada, lo que es un tiempo más que suficiente para que exhiba el extraño comportamiento de una superposición cuántica. Por ejemplo, un electrón solo tarda una milbillonésima parte de ese intervalo (unos 10^{-15} segundos) en orbitar un átomo, así que su capacidad para estar en todas las partes del átomo al mismo tiempo casi no se verá afectada.

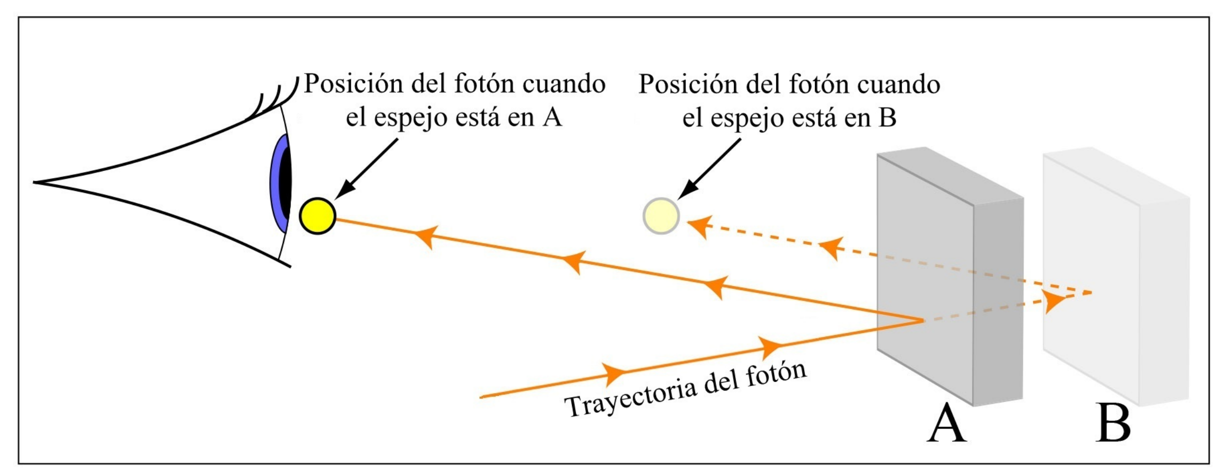


Figura 8.5: Al sacar una fotografía con flash en una habitación oscura, los fotones que regresan a la cámara contienen información codificada sobre lo que hay en la estancia. En esta figura se ve que un sólo fotón puede «medir» cosas: cuando un fotón rebota contra un espejo, su propia posición guarda información codificada sobre la posición del espejo. Si el espejo está tanto en *A* como en *B* en una superposición cuántica, entonces no importa si es una persona o un simple fotón quien descubre dónde está: en ambos casos, la superposición cuántica se destruye de manera efectiva.

Es más, si una molécula de aire choca contra una pelota de bolos y guarda información codificada sobre la posición de esta en su propia ubicación (como en la figura 8.5), esta molécula chocará pronto contra muchas otras moléculas, las cuales también obtendrán información. Se parece mucho a cuando Wikileaks cuelga información confidencial en la red: esta se copia, se copian las copias y enseguida circula tanto que en la práctica es imposible que la información vuelva a ser secreta. Y si la información ya no puede volver a ser secreta, ya no se puede restablecer la superposición cuántica. ¡Al fin entendía por qué los universos paralelos del nivel III son paralelos!

Aquella noche sentía que la suerte estaba de mi lado. Analicé el tema con mayor detalle cuantitativo. Por ejemplo, la mayoría de las cosas pueden estar no solo en dos sitios a la vez, sino en muchos, así que calculé también este caso, tal como ilustra la figura 8.6. En el fondo descubrí que un fotón destruye la mayoría de la superposición cuántica, pero permite que sobreviva una pequeña parte de ella: una superposición tan solo igual de amplia que su longitud de onda. Un fotón con una longitud de onda de 0,0005 milímetros actúa en esencia como un observador capaz de medir la posición de algo con una precisión de 0,0005 milímetros. En el capítulo anterior vimos que *todas* las partículas se comportan como ondas y tienen una longitud de onda, y mostré que cuando una partícula cualquiera rebota contra algo, las superposiciones cuánticas más amplias que la longitud de onda quedan destruidas.

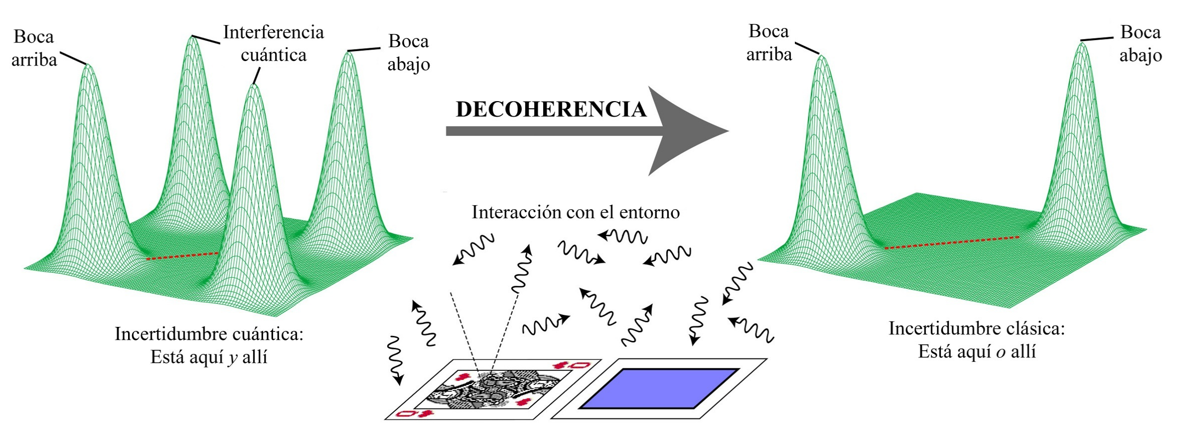


Figura 8.6: Su conocimiento de la posición del naipe caído se puede describir mediante lo que se denomina matriz de densidad, que puede representarse como una superficie con prominencias, tal como se ilustra aquí. La altura de la superficie a lo largo de la diagonal (línea discontinua) indica la probabilidad de que encuentre la carta en varios lugares, mientras que la altura de la superficie en cualquier otro lugar específica, en términos generales, la cantidad de rareza cuántica, en qué medida la carta se encuentra en más de un lugar al mismo tiempo. La matriz de densidad de la izquierda se corresponde con un naipe que se encuentra por igual en los dos lugares representados en la parte inferior, en superposición cuántica, tal como revelan los dos picos etiquetados como «interferencia cuántica». En cuanto un fotón rebota en la carta, la decoherencia elimina esos dos picos y da lugar a la matriz de densidad que aparece a la derecha y que se corresponde con el naipe situado a todos los efectos en uno solo de los dos lugares, solo que usted aún ignora en cuál de ellos. La anchura de estos picos, escasa, se corresponde con cierta incertidumbre cuántica residual alrededor de las posiciones boca arriba y boca abajo del naipe.

Sabía desde hacía años que me encantaba la física y que quería dedicar la vida a ella. Pero siempre me había preguntado si tendría la capacidad de aportar, en lugar de limitarme a estudiarla y celebrarla desde fuera de la cancha. Cuando al fin me retiré a dormir aquella noche, por primera vez en mi vida pensé: *¡Sí que puedo!* ¿Acabaría conociéndose mi hallazgo como el «efecto Tegmark»? Sabía que pasara lo que pasara, jamás olvidaría la emoción que

me embargó aquella velada. Me sentí muy afortunado por todas las oportunidades que había tenido y por toda la gente inspiradora que me había permitido participar en la gran aventura de la ciencia. Parecía demasiado bueno para ser cierto. Y lo era…

Dos semanas después desarrollé aquellos cálculos en un primer borrador de artículo científico que titulé «Colapso aparente de la función de onda causado por esparcimiento». *Esparcimiento* es el término técnico que se emplea para aludir al comportamiento de las partículas que rebotan en la materia. Era la primera vez que escribía un artículo para publicarlo, y me sentía igual que en Nochebuena cuando era pequeño. Mi caligrafía zurda siempre había sido espantosa (casi todos los deberes de la escuela volvían con comentarios del tipo «¡Debe mejorar la presentación!»), y fue fascinante ver mis ilegibles garabatos convertidos en primorosas ecuaciones de imprenta. Al mismo tiempo, me entró la curiosa paranoia de que alguien ya hubiera descubierto aquello sin que yo lo supiera. Supuse que algo tan básico aparecería mencionado en los manuales y se enseñaría en las clases de física cuántica durante los estudios de grado si ya se conociera, pero, aun así, casi me echaba a temblar cada vez que abría una referencia sospechosa durante la búsqueda de fuentes bibliográficas. Hasta aquí todo bien…

Anticipándome a mi estreno editorial, hasta decidí cambiarme el apellido por otro más exclusivo, y dejé de usar el apellido de mi padre, *Shapiro*, para adoptar el de mi madre, *Tegmark*. En Suecia me encantaba llamarme *Shapiro* porque era muy exclusivo: solíamos ser la única familia del país con ese nombre. Pero, para mi horror, descubrí que en el ámbito académico internacional era tan único como *Andersson* allá por mi tierra. El colmo fue cuando efectué una búsqueda de bases de datos de autores de artículos de física llamados «M. Shapiro» y obtuve miles de resultados. Hasta había tres personas M. Shapiro en mi propio Departamento de Física de Berkeley, ¡una de las cuales (Marjorie) me había impartido la asignatura de física de partículas! Sin embargo, hasta donde yo había podido averiguar, mi madre y su familia eran los únicos Tegmark del planeta. Me inquietaba un poco que mi padre malinterpretara aquel cambio de nombre como alguna clase de rechazo hacia él, pero cuando le pregunté sobre el asunto, me aseguró que no le importaba en absoluto con una cita de Shakespeare: «¿Qué hay en un nombre?».

Las satisfacciones de que se te adelanten

Fue un mes después, tras mi regreso de las vacaciones de Navidad en Suecia y a punto de presentar el artículo, cuando todo se vino abajo. Tanto tiempo. Tanto entusiasmo. Tanta alegría. Tantas emociones. Tantas esperanzas. Y ¡bum!: todo se volvió humo en cuestión de minutos. ¿Quién encendió la cerilla? Pues fue el propio Andy Elby, al contarme lo que ya había hecho un físico polaco llamado Wojciech Zurek. ¡A olvidarse del efecto Tegmark! Aquello ya tenía nombre: *decoherencia*. De hecho, no tardé en enterarme de que el físico alemán Dieter Zeh había descubierto el mismo efecto ya en 1970.

Al principio no me afectó demasiado, como suele pasarme cuando recibo una mala noticia. Después bromeé sobre el tema con mis amigos Wayne, Justin y Ted. Más tarde me fui a casa sin darme cuenta de que en realidad estaba al borde del abismo, y me enzarcé en una discusión estúpida con mi novia sobre algo verdaderamente trivial: había cocinado el arroz justo para ella y una amiga, y a mí me dio un poco de arroz que había en el congelador. De repente me sentí tan apenado que quise llorar, pero ni siquiera lo conseguí.

Poco a poco las emociones que me invadían al saber que se me habían adelantado cambiaron por completo. En primer lugar, la razón principal por la que me dedico a la ciencia radica en la satisfacción de descubrir cosas, y redescubrir algo es tan emocionante como ser el primero en descubrirlo, porque en el instante en que lo descubres no sabes si ya se conoce o no. En segundo lugar, como creo que ahí fuera existen civilizaciones más avanzadas (en universos paralelos, cuando no incluso en el nuestro), *todo* lo que descubrimos aquí, en nuestro planeta particular es un redescubrimiento, y está claro que esta circunstancia no le resta diversión al asunto. En tercer lugar, cuando se descubre algo por uno mismo, seguramente se comprende mejor y sin lugar a dudas se valora más. El estudio de la historia me ha hecho reparar también en que buena parte de los hitos científicos se redescubrieron en repetidas ocasiones porque, cuando las preguntas correctas pululan por el aire y ya existen las herramientas necesarias para responderlas, mucha gente llega de manera natural e independiente a las mismas respuestas. De la clase de cuántica recuerdo la impertérrita ironía de Eugene Commins: «Se llama ecuación de Klein-Gordon porque la descubrió Schrödinger».

Desde entonces he redescubierto muchas otras cosas, y lo habitual es encontrarse con que se va redescubriendo todo lo básico, pero que además el trabajo propio desarrolla algunos detalles interesantes que otros no vieron, y viceversa, lo que aún permite salvar una publicación menos impactante, pero que reconozca el trabajo previo y le aporte algo. Esta vez fue casi

espeluznante: yo había confeccionado una lista con las 10 fuentes naturales principales de decoherencia, desde la materia obvia, como el aire y la luz del Sol, hasta cosas frente a las que no cabe casi apantallamiento protector, como la radiactividad de fondo o los neutrinos procedentes del Sol, y después me encontré con un artículo precioso de Zeh y su alumno Erich Joos publicado seis años antes con una tabla prácticamente idéntica. Mi artículo (**http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9310032.pdf**) aún contenía suficiente material novedoso como para conseguir que lo admitieran en una publicación menos prestigiosa, pero si había contado con estrenar mi andadura editorial con una espléndida zambullida de cabeza, aquello se parecía más bien a una torpe caída de panza.

Visto en perspectiva, aquella primera vez que se me adelantaron no fue la más hilarante, sino la de 1995, cuando ideé una técnica para medir el estado cuántico (la función de onda o la matriz de densidad) de una partícula. Nunca olvidaré cómo se me descolgó la mandíbula la noche que me disponía a presentarla y me quedé de pie como un idiota en la biblioteca vacía, mirando fijamente un artículo ya publicado: aquellos tipos no solo se me habían adelantado, sino que habían desarrollado un diagrama muy elaborado y pedagógico prácticamente idéntico al mío, y le habían puesto a esa técnica el mismísimo y rebuscado nombre que yo: *tomografía en el espacio de fases*. Solo conseguí exclamar «¡HURF!», una palabra muy especial que habíamos inventado mi hermano Per y yo, y que reflejaba el momento a la perfección.

Con el tiempo acabé conociendo a muchos de aquellos intimidatorios competidores anónimos, y descubrí que todos eran personas estupendas. Zeh y Zurek me mandaron correos electrónicos de apoyo para que prosiguiera con mi trabajo y me invitaron a visitarlos y dar conferencias. En 2004, visité a Wojciech Zurek en Los Álamos y conocí una de las mayores ventajas de ser científico: te invitan a visitar lugares exóticos donde te pasas el tiempo charlando con gente fascinante y ¡resulta que a eso lo llamas *trabajo*, y hasta te pagan el viaje! Wojciech Zurek tenía una gran cabellera rizada y un intenso destello pícaro en los ojos que dejaba entrever su gusto por la aventura, tanto en la investigación como en el ocio. Una vez me convenció para escalar por debajo un saliente de roca en la zona acordonada que rodea la majestuosa catarata Gullfoss de Islandia para acercarnos a un metro del agua. De repente la cascada cambió de dirección y me pregunté cuántos universos paralelos acabarían de perder de golpe a dos teóricos de la decoherencia. Cuando visité a Dieter Zeh y a su grupo en Heidelberg en 1996, me sorprendieron las escasas distinciones que había recibido por el trascendental descubrimiento de

la decoherencia. De hecho, los cascarrabias que tenían por colegas en el Departamento de Física de Heidelberg habían desestimado gran parte de su trabajo por considerarlo demasiado filosófico, y eso que el departamento estaba ubicado en la «Calle Filósofo». Habían trasladado sus reuniones de grupo a un edificio eclesiástico, y me quedé atónito al saber que la única financiación que habían conseguido para escribir el primer libro que existe dedicado a la decoherencia provino de la Iglesia Luterana alemana.

Aquello me hizo ver que Hugh Everett no fue una excepción: el estudio de los fundamentos de la física no es la receta para cosechar la seducción y la fama. Se parece más al arte: la mejor razón para practicarlo es que te apasione. Solo una pequeña minoría de colegas físicos elige trabajar en las grandes cuestiones, y cuando establezco contacto con ellos siento una afinidad plena. Imagino que un grupo de amigos que haya desaprovechado la oportunidad de trabajar en algo lucrativo para convertirse en poetas sentirá una comunión parecida, conscientes de que todos se dedican a eso no por dinero, sino por la aventura intelectual que supone.

Siempre que la persona que cae a mi lado en un avión me plantea preguntas científicas, me acuerdo de cuál es la manera adecuada de pensar en la competencia y el hecho de que se te adelanten. En el asiento del avión soy un embajador del Reino de la Física que disfruta y se enorgullece describiendo, no lo que ha hecho él personalmente, sino lo que hemos logrado los físicos como comunidad. A veces soy yo quien se adelanta, más a menudo me adelantan otros, pero la clave es que juntos aprendemos unos de otros, nos inspiramos unos a otros y conseguimos más logros de los que cualquier persona en solitario podría llegar a soñar. Es una comunidad maravillosa y yo me siento tremendamente afortunado de formar parte de ella.

Por qué el cerebro no es un ordenador cuántico

«*Sir* Roger Penrose es incoherente, y Max Tegmark afirma que puede demostrarlo». ¡Caramba! Eso decía la primera línea de una noticia que leí en el número del 4 de febrero de 2000 de la revista *Science*, para mi gran desconcierto. Jamás llamé incoherente al célebre físico matemático, pero a los periodistas les encantan tanto las polémicas como los juegos de palabras, y yo había escrito un artículo (**http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9310032.pdf**) en el que sostenía que una de las ideas de Penrose había muerto por decoherencia.

En los últimos años ha crecido el interés por el desarrollo de los llamados ordenadores cuánticos, los cuales explotarían la rareza de la mecánica cuántica para resolver más rápidamente determinados problemas. Por ejemplo, si usted compró este libro por Internet, el número de la tarjeta de crédito utilizada se codificó mediante un sistema basado en que la multiplicación de dos números primos de 300 dígitos entre sí es rápida, mientras que la factorización del número de 600 dígitos resultante (para averiguar de qué dos números es el producto) es difícil, y los mejores ordenadores actuales necesitarían más tiempo para resolverlo que la edad de nuestro universo. Si se pudiera crear una computadora cuántica, cualquier pirata informático podría usarla para hallar la respuesta con bastante rapidez, y sustraer el dinero de su cuenta, usando un algoritmo cuántico inventado por mi colega del MIT Peter Shor. O, tal como lo expresa el precursor de la computación cuántica: «Los ordenadores cuánticos comparten información con numerosas versiones de sí mismos a lo largo y ancho del multiverso», y en este universo nuestro consiguen resultados más deprisa porque, en cierto modo, cuentan con la ayuda de esas otras versiones. Una computadora cuántica también podría simular el comportamiento de átomos y moléculas con gran eficacia sustituyendo las mediciones de laboratorios químicos, del mismo modo que las simulaciones en los ordenadores convencionales han reemplazado a las mediciones tomadas en túneles de viento. Muchas computadoras modernas calculan más deprisa usando múltiples procesadores en paralelo. Un ordenador cuántico vendría a ser el ordenador en paralelo superlativo, porque usa el multiverso del nivel III como un recurso computacional y, en cierto sentido restringido, efectúa distintos cálculos paralelos en universos paralelos.

Para crear una máquina así hay que superar grandes obstáculos en el ámbito de la ingeniería, como aislar la información cuántica lo bastante bien como para que la decoherencia no estropee las superposiciones cuánticas. Aún queda mucho por hacer: mientras que el ordenador de su teléfono móvil probablemente ya almacene miles de millones de bits de información (ceros y unos), las computadoras cuánticas más novedosas desarrolladas en laboratorios de todo el mundo solo alcanzan a almacenar un puñado de ellos. Sin embargo, Penrose y otros plantearon un supuesto impactante: ¡puede que ya tengamos un ordenador cuántico… en la cabeza! Sostenían que los cerebros humanos (o, cuando menos, algunas partes de él) son computadoras cuánticas, y que esto es determinante para comprender la consciencia.

Como la decoherencia arruina los efectos cuánticos, decidí usar las fórmulas de la decoherencia que había estado elaborando para comprobar si la idea de Penrose funcionaba de verdad. Primero realicé los cálculos con las neuronas (figura 8.7), los cientos de miles de millones de células nerviosas que, cual cables, transmiten señales eléctricas dentro del cerebro. Las neuronas son finas y alargadas: si usted pusiera las suyas en fila una detrás de otra, darían unas cuatro vueltas a la Tierra. Transmiten señales eléctricas transportando átomos de sodio y potasio a los que les falta un electrón (y, por tanto, tienen carga eléctrica positiva). Si conectara un voltímetro a una neurona en reposo, el instrumento registraría 0,07 voltios entre el interior y el exterior de la célula. Si un extremo de la neurona se activa para reducir ese voltaje, entonces las entradas sensibles al voltaje de la pared celular se abren, los átomos de sodio con carga eléctrica empiezan a atravesarla a chorro, el voltaje cae y cada vez entran más átomos. Esta reacción en cadena, llamada *disparo* o *descarga*, se propaga a lo largo de la neurona a una velocidad de hasta 300 kilómetros por hora, al mismo tiempo que alrededor de un millón de átomos de sodio penetran en la célula. El axón se recupera con rapidez, y las neuronas veloces llegan a repetir este proceso de disparo más de 1000 veces por segundo.

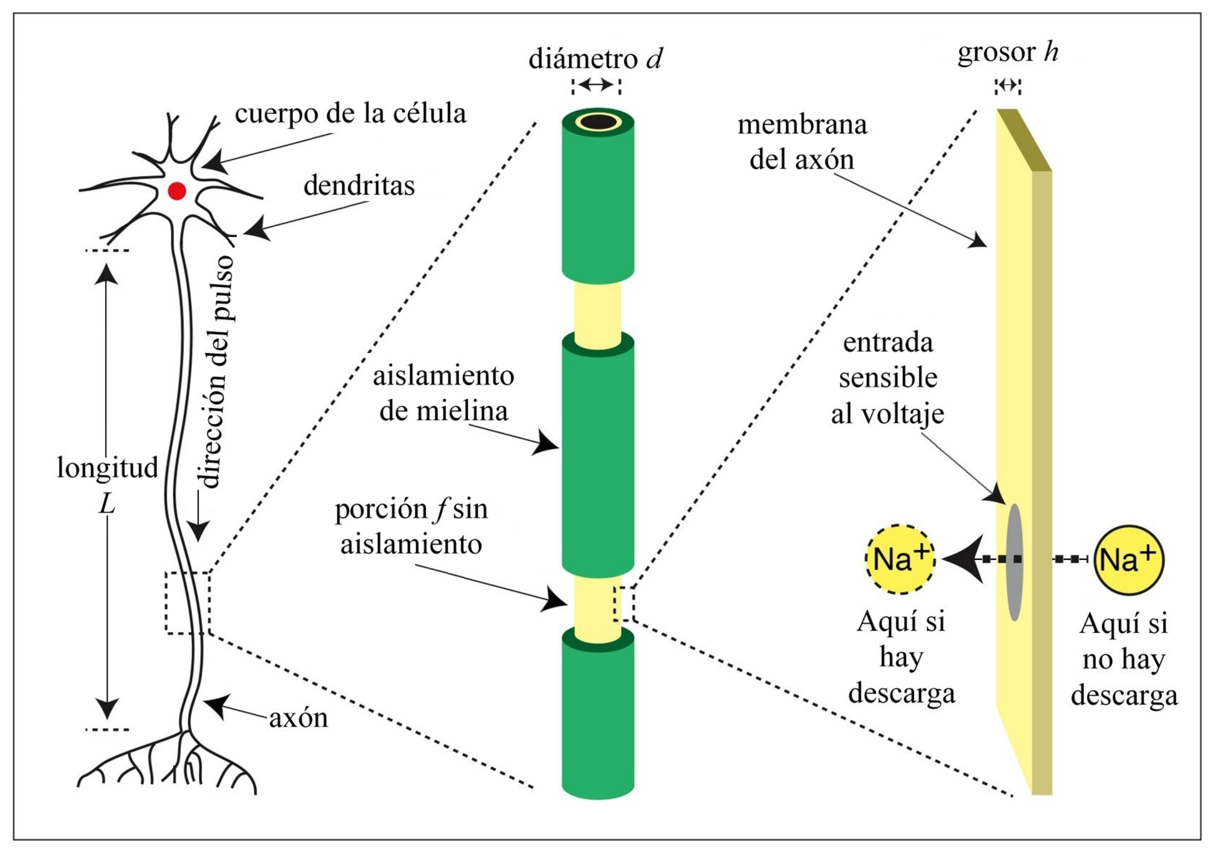


Figura 8.7: Representación esquemática de una neurona (izquierda), de una sección de la parte alargada con forma de cable llamada axón (centro), y de un fragmento de la membrana del axón

(derecha). El axón suele estar protegido por un material aislante llamado mielina que tiene pequeños espacios desnudos cada medio milímetro aproximadamente donde se concentran las entradas de sodio y potasio sensibles al voltaje. Si la neurona se encontrara en una superposición de disparo y no disparo, entonces alrededor de un millón de átomos de sodio (con el símbolo *Na*) se hallarían en la superposición de estar dentro y fuera de la célula (derecha).

Ahora bien, supongamos que el cerebro fuera un ordenador cuántico, y que las descargas neuronales estuvieran implicadas de algún modo en la computación. Cada neurona individual debe tener la capacidad de estar en una superposición de disparo y no disparo, lo que significa que alrededor de un millón de átomos de sodio están en dos lugares a la vez, dentro y fuera de la neurona. Tal como dijimos con anterioridad, un ordenador cuántico funciona tan solo mientras su estado sea secreto para el mundo exterior, de modo que ¿cuánto tiempo puede una neurona mantener en secreto si está emitiendo una descarga o no? Cuando introduje los números, obtuve la respuesta de que «no mucho en realidad» o, para ser más exactos, alrededor de 10^{-20} (una cientrillonésima) de segundo. Ese es el tiempo que pasará hasta que una molécula de agua al azar sea bombeada al interior de uno de los millones de átomos de sodio y descubra en qué lugar se encontraba, con lo que destruirá la superposición cuántica. Asimismo, realicé los cálculos para otro modelo que había propuesto Penrose, donde la computación cuántica no se realizaría mediante neuronas, sino mediante los microtúbulos que conforman parte del esqueleto de las células, y vi que sufrían decoherencia después de unos 10^{-13} (una diezbillonésima) de segundo. Para que mis pensamientos fueran equivalentes a una computación cuántica, tendrían que acabar antes de que empezara la decoherencia, así que tendrían que funcionar lo bastante deprisa como para generar 10 000 000 000 000 pensamientos por segundo. Tal vez Roger Penrose piense a esa velocidad, pero yo no, desde luego…

En realidad no es de extrañar que el cerebro humano no funcione como un ordenador cuántico: los colegas físicos que trabajan en el desarrollo de ordenadores cuánticos dedican grandes esfuerzos a combatir la decoherencia, por lo común aislando los instrumentos en un vacío frío y oscuro, para mantener su estado en secreto ante el resto del mundo, mientras que el cerebro es un lugar tibio y húmedo cuyas partes no están aisladas. Sin embargo, hubo quien protestó por mi artículo, y así fue como experimenté mi primera controversia científica. En particular, Stuart Hameroff, uno de los primeros en hablar de la consciencia cuántica, declaró que fue como si «hubiera lanzado una bomba fétida en esa especialidad» y que causé problemas a los estudiosos de la consciencia cuántica. «¿Es usted un sicario de la ortodoxia científica?», me preguntó.

Aquello me pareció bastante irónico, puesto que normalmente me sitúo en el lado opuesto a la ortodoxia científica, y tiendo a adherirme de manera instintiva a los desvalidos que persiguen ideas a contracorriente. Además, no había efectuado esos cálculos con la intención de llegar a un resultado concreto, sino tan solo para averiguar la respuesta. De hecho, lo más probable es que me hubiera alegrado más la conclusión opuesta, porque me habría parecido fantástico contar con mi propia computadora cuántica. Hameroff publicó más tarde junto con otros dos coautores una crítica de mi artículo que consideré muy errónea[42], y no pude evitar pensar que a veces los científicos nos aferramos a una idea con tal fervor casi religioso que ningún dato consigue apartarnos de ella. Me pregunté si la impresionante terminología técnica no era más que un intento de racionalizar este alegato: «La consciencia es un misterio y la mecánica cuántica es un misterio, de modo que tienen que estar relacionadas».

Al final acabé conociendo a Stuart Hameroff en 2009 y me pareció un tipo bastante jovial y agradable. Comimos juntos en Nueva York y, aunque parezca mentira, no fuimos capaces de concretar un solo cálculo o dato en el que discrepáramos, así que acordamos educadamente discordar en cuanto a la relevancia de todo ello para la consciencia.

Sujeto, objeto y entorno

Debo hacer una confesión: aquellos cálculos que efectué para esclarecer la decoherencia del cerebro no fueron más que una excusa. Tenía una idea que me entusiasmaba y quería publicar, pero supuse que la considerarían demasiado filosófica para aceptarla. De modo que ideé lo que llamé mi estrategia de Caballo de Troya: ocultar la parte filosófica que quería que pasara el arbitraje tras páginas y páginas de ecuaciones de aspecto respetable. Lo gracioso es que la estrategia funcionó para que aceptaran el artículo, pero fracasó en cuanto a que la gente prestó atención tan solo al material encubridor: eso de que el cerebro no es un ordenador cuántico.



Figura 8.8: Conviene descomponer el mundo en tres partes: la parte correspondiente a las percepciones subjetivas (el sujeto), la parte estudiada (el objeto) y todo lo demás (el entorno). Tal como se indica, las interacciones entre estas tres partes generan efectos cualitativos muy diferentes, y aportan una visión unificadora que incluye tanto la decoherencia como el colapso aparente de la función de onda.

¿Y cuál era ese mensaje oculto? Pues una manera unificadora de pensar en la realidad cuántica, tal como ilustra la figura 8.8. Feynman había subrayado que la mecánica cuántica separa nuestro universo en dos partes: el objeto en consideración y todo lo demás (denominado el *entorno*). Sin embargo, a mí me parecía que faltaba una pieza importante del rompecabezas cuántico: la mente. Tal como había evidenciado el trabajo de Everett, la comprensión del proceso de observación nos obliga a introducir además una tercera parte del universo: el estado mental de quien observa, etiquetado como *sujeto* en la figura 8.8[43].

A los no físicos tal vez les parezca curioso que apenas se hable de la mente en el ámbito de la física, dado todo el revuelo que se ha formado en la mecánica cuántica en relación con las observaciones. Al fin y al cabo, hablar de observaciones sin mencionar la mente es como hablar de miopía sin mentar el ojo. Creo que la explicación radica en que, como no entendemos el funcionamiento de la consciencia, casi todos los físicos se sienten incómodos incluso hablando de ella, ante el temor de que los tachen de demasiado filosóficos. Personalmente considero que el simple hecho de no entender algo no implica que podamos ignorarlo y, aun así, esperemos llegar a las respuestas correctas.

Hablaré mucho más sobre la mente humana en el próximo capítulo. Pero para entender la figura 8.8 no importan en absoluto los detalles de cómo funciona la mente: la única afirmación que hago ahí es que la consciencia subjetiva de cada cual resulta en cierto modo de los complejísimos movimientos de las partículas que conforman el cerebro, y que esas partículas obedecen la ecuación de Schrödinger exactamente igual que todas las demás partículas.

En mi artículo Caballo de Troya separé la ecuación de Schrödinger en varios trozos: tres de ellos gobiernan las tres partes de nuestro universo (sujeto, objeto y entorno) y otros trozos adicionales rigen las interacciones entre esas partes. Después analicé los efectos de las diferentes partes de la ecuación y mostré que una parte producía la materia que abordan los libros de texto, otra parte daba lugar a los múltiples mundos de Everett, otra parte brindaba la decoherencia de Zeh, y otra parte generaba algo nuevo. Los libros de texto convencionales se han centrado tan solo en la parte de la ecuación de Schrödinger que gobierna el objeto (por ejemplo, un átomo), de acuerdo con el espíritu reduccionista de que las cosas deberían ser analizables por sí mismas sin tener que preocuparse por el todo más amplio del que forman parte. La interacción entre el sujeto y el objeto da lugar a los universos paralelos de Everett (páginas 186−197), lo que prolonga las superposiciones cuánticas desde el objeto hasta el observador, el sujeto. La interacción entre el entorno y el objeto produce la decoherencia (páginas 202-205), lo que explica por qué los objetos grandes, como la reina de corazones, nunca muestran signos de un comportamiento cuántico extraño, como estar en dos sitios a la vez. Por lo común resulta imposible eliminar esta decoherencia en la práctica, pero incluso en experimentos mentales que permitieran hacerlo (por ejemplo, repitiendo el experimento de los naipes cuánticos en una habitación oscura, fría y sin aire, donde un solo fotón incidiera contra la carta y después fuera

percibido por un ojo), no habría ninguna diferencia: como la carta está en dos sitios a la vez, también lo estaría el fotón, y también al menos una neurona de los nervios ópticos del observador entraría en una superposición de disparo y no disparo al mirar la carta y, como ya hemos visto, esta superposición entrará en decoherencia en unos 10^{-20} segundos.

Pero esa decoherencia aún no explica por completo la razón de que nunca veamos la rareza cuántica, porque los procesos del pensamiento humano (las dinámicas internas del sujeto) podrían crear superposiciones raras de estados mentales que nos son familiares. Por suerte, en este caso acude al rescate la tercera interacción de la figura 8.8: la interacción entre el sujeto y el entorno. El hecho de que las neuronas entren en decoherencia mucho más rápidamente que su capacidad para procesar información implica que si los complejos patrones de descargas neuronales del cerebro humano guardan alguna relación con la consciencia, la decoherencia en el cerebro evitará que experimentemos superposiciones raras.

Esta interacción entre el sujeto y el entorno también contribuye a atar otro cabo suelto. Wojciech Zurek había continuado con su estudio de la decoherencia más allá de lo que yo había redescubierto, y había evidenciado que la decoherencia hace otra cosa importante para nosotros: no solo explica por qué los objetos grandes nunca parecen estar en dos sitios a la vez, sino que también explica por qué son tan especiales los estados convencionales (como estar en un solo lugar): de entre todos los estados que la mecánica cuántica permite a los objetos grandes, estos estados convencionales son los más robustos ante la decoherencia y, por tanto, los únicos que sobreviven. Es algo parecido a por qué los desiertos suelen tener cactus en lugar de rosas: son los más robustos para ese entorno. De hecho, un artículo sobre este mismo tema que escribí con mi padre fue el motivo de que Wojciech me invitara a dar una charla en Los Álamos.

Ahora bien, se puede reducir parte de la decoherencia usando ingeniosos equipos de laboratorio, como bombas de vacío y refrigeradores extremos, pero nunca podremos apagar la decoherencia de las neuronas. No sabemos cómo funciona la mente humana, pero sí sabemos con seguridad que toda la información que recibe del mundo exterior debe pasar primero por las neuronas de los órganos sensoriales, como por ejemplo los nervios ópticos del ojo y los nervios cocleares del oído, y todos ellos entran en decoherencia con una rapidez tremenda. Así que en el momento en que somos subjetivamente conscientes de cualquier observación relacionada con el mundo exterior, las cosas ya han caído en decoherencia, lo que garantiza que nunca notaremos

ninguna rareza cuántica y explica por qué solo percibimos estados convencionales robustos.

Algunas de las numerosas controversias físicas que existen son tan imponentes que destacan por encima del resto y duran varias generaciones. Está claro que la gran controversia sobre cómo interpretar la mecánica cuántica es una de ellas. Otra guarda relación con la *segunda ley de la termodinámica*, la cual establece que la entropía de un sistema aislado nunca decrece, siendo la entropía una medida cuantitativa de la información que nos falta sobre un sistema, en esencia, la cantidad de bits de información que necesitaríamos para especificar su estado cuántico. Por un lado, algunos científicos la han elevado a una categoría casi sagrada, y el gran astrofísico *sir* Arthur Eddington proclamó: «La ley de que la entropía siempre aumenta ocupa, en mi opinión, el lugar más destacado entre las leyes de la naturaleza. Si alguien le dice a usted que su teoría preferida del universo se opone a las ecuaciones de Maxwell, peor para las ecuaciones de Maxwell. Si resulta que contradice la observación, bueno, los experimentalistas también hacen chapuzas algunas veces. Pero si se descubre que su teoría contraviene la segunda ley de la termodinámica, pierda toda esperanza; caerá sin remedio en la más profunda de las humillaciones». Por otro lado, titanes de la física como Maxwell, Gibbs, Loschmidt y Poincaré han opuesto serias objeciones a la segunda ley, y aún no existe consenso sobre si se han resuelto todas ellas de manera satisfactoria.

En mi opinión, estas dos grandes controversias de la mecánica cuántica y la termodinámica están relacionadas, en tanto que ambas se resuelven de un plumazo si usamos la definición oficial de entropía en mecánica cuántica (aportada por John von Neumann), si rechazamos el colapso de la función de onda, y si tenemos en cuenta todas las partes de la realidad: sujeto, objeto y entorno.

Tal como se sintetiza en la figura 8.8, la toma de datos y la decoherencia se corresponden con la interacción del objeto con el sujeto y con el entorno, respectivamente. Aunque los procesos de toma de datos y de decoherencia puedan parecer distintos, la entropía establece un paralelismo interesante entre ellos relacionado con la falta de información que tenemos sobre el objeto, que es una cantidad muy importante que en física denominamos *entropía*. Si el objeto no interacciona con nada, su entropía se mantiene constante: un segundo después sabemos lo mismo sobre su estado porque ese estado se puede calcular a partir del estado inicial usando la ecuación de Schrödinger. Si el objeto interacciona con el observador, entonces lo normal

es que este obtenga más información sobre el objeto, y que la entropía disminuya (al abrir los ojos en la figura 8.1, hay dos copias de usted, cada una de ellas ve un resultado diferente, pero ambas saben cómo cayó la carta en su universo paralelo y, por tanto, ha conseguido un poco más de información sobre la carta). En cambio, si el objeto interacciona con el entorno, lo habitual es que perdamos información sobre él, de modo que la entropía aumenta: si Philip sabe dónde están sus cartas Pokémon, tendrá menos información sobre su paradero después de que Alexander haya enredado con ellas. De forma similar, si sabes que una carta se encuentra en un estado cuántico correspondiente a hallarse en dos sitios a la vez, y después una persona o un fotón descubre dónde está sin informarte de ello, habrás perdido un poco de información acerca de ella: al principio conocías su estado cuántico, pero ahora se encuentra a todos los efectos en uno de los dos estados cuánticos, y no sabes en cuál. En resumen, esta es mi concepción informal de todo esto: la entropía de un objeto decrece mientras lo miras, y aumenta mientras no lo miras. La decoherencia no es más que una medida cuyo resultado desconoces. Siendo más rigurosos, la segunda ley de la termodinámica admite una reformulación más matizada:

1. La entropía del objeto no puede disminuir a menos que este interaccione con el sujeto.
2. La entropía del objeto no puede aumentar a menos que este interaccione con el entorno.

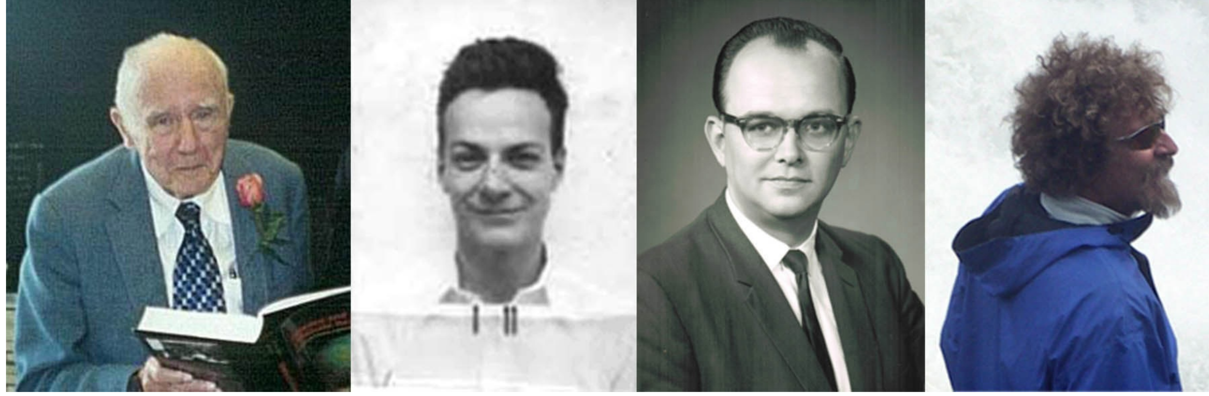


Figura 8.9: John Wheeler tal como lo recuerdo (en esta fotografía de 2004 sostiene un libro del congreso celebrado en su noventa cumpleaños, el cual ayudé a organizar); acompañado por sus doctorandos Richard Feynman (hacia 1943), Hugh Everett (hacia 1957) y Wojciech Zurek (en 2007 junto a aquella cascada de Islandia). (*Créditos de imágenes: Pamela Bond Contractor [Ellipses Enterprises], Mark Oliver Everett, Anthony Aguirre*).

La formulación tradicional de la ley equivale simplemente a ignorar el sujeto. Cuando publiqué un artículo técnico sobre este tema

(**http://arxiv.org/pdf/11083080.pdf**)[44], incluí una demostración matemática de la segunda parte (cómo hace la decoherencia que aumente la entropía), pero no conseguí una demostración rigurosa de la primera parte, aunque mis simulaciones por ordenador apuntaban con fuerza a que era cierta. Entonces sucedió algo fantástico que me recordó por qué es una gran suerte que acabara trabajando en el MIT: un alumno universitario armenio de veinte años, Hrant Gharibyan, me preguntó si tenía algunos problemas interesantes en los que pudiera trabajar. Formamos equipo y abordó el problema con tanto fervor que devoraba libros de matemáticas como si fueran palomitas de maíz y llegó a dominar herramientas matemáticas como los productos de Schur y la mayoración espectral, que la mayoría de los físicos desconocen y que yo aprendí gracias a mi padre, que es matemático. Así fue como un buen día vi a Hrant y supe por su sonrisa triunfal ¡que había resuelto el problema! Ya hemos publicado nuestra demostración: **http://arxiv.org/pdf/13097349.pdf**

Suicidio cuántico

Tenía la sensación de que había dos clases de físicos: los titanes y los simples mortales. Los titanes eran figuras históricas imponentes como Newton, Einstein, Schrödinger y Feynman, dotadas de poderes sobrenaturales y rodeadas de leyendas y mitos. Los simples mortales eran los físicos que yo conocía y que, aunque en ocasiones fueran brillantes, eran sin lugar a dudas gente normal como usted y como yo. Y después estaba John Wheeler. Cuando lo vi en enero de 1996, me quedé pasmado. Allí estaba él a sus ochenta y cuatro años en la cafetería de Copenhague donde se celebraba la comida de nuestra conferencia. Para mí era el «último de los titanes». Había trabajado con Niels Bohr en física nuclear. Había acuñado el término *agujero negro*. Había prefigurado la espuma espaciotemporal. Había tenido a Feynman y Everett como doctorandos. Se había convertido en uno de mis superhéroes por su pasión por las ideas atrevidas. Y allí estaba él, comiendo sin más, ¡como un simple mortal! Supe que *debía* presentarme, o nunca me lo perdonaría, pero estaba nerviosísimo a medida que me acercaba a su mesa. Otros por encima de mí en la cadena alimenticia académica ya me habían ignorado con anterioridad: dos profesores distintos me habían dado la espalda y se habían marchado dejándome con la palabra en la boca, y eso que eran simples mortales. Así que lo que ocurrió a continuación me dejó atónito. Allí estaba yo, un investigador posdoctoral inexperto y un absoluto don nadie,

pero Wheeler me saludó con una cálida sonrisa ¡y me invitó a sentarme a comer con él! Tras oír lo que me interesaba de la física cuántica, me comentó algunas de sus ideas nuevas sobre el asunto de la existencia, y me dio una copia de algunas de sus últimas notas. En ningún momento me habló en tono condescendiente, y durante aquella conversación me sentí como un igual, aunque claramente no lo era. Quince días después hasta recibí un correo suyo (¡un mensaje de un titán!) en el que decía:

> *Para mí fue un gran placer y estímulo conversar con usted en Copenhague porque creo que comparte mi convencimiento de que debajo y detrás de la mecánica cuántica yace algún principio profundo y prodigioso que no se ha descubierto aún, del mismo modo que la excelsa idea geométrica de Einstein arrojó luz repentina sobre el poder y el alcance de la teoría supuestamente universal de Newton. La probabilidad de que se produzca tal hallazgo es sin duda proporcional a nuestro convencimiento de que ahí hay algo por descubrir.*

Proseguía animándome a acudir a Princeton diciendo «estoy deseando poder charlar con usted a diario». En aquel momento, me debatía entre distintas ofertas posdoctorales. ¿Cómo iba a rechazar Princeton después de aquello? Una vez instalado en Princeton, empecé a visitarlo con regularidad, y poco a poco lo fui conociendo mejor. Él y su esposa asistieron a la fiesta de inauguración de mi casa. Y él hasta firmó mi certificado de matrimonio en Nueva Jersey: en mi mundo aquello era como poner a Dios por testigo.

En su despacho lo interrumpían a menudo, de modo que su forma preferida de conversar era «haciendo órbitas», paseando por los pasillos de la tercera planta, que discurrían alrededor de los patios interiores, del edificio de física de la Universidad de Princeton. Las pintorescas anécdotas que contaba me hicieron vivir la historia en primera persona, como cuando describía cómo se sintió al ver estallar la primera bomba de hidrógeno, y al conocer a Klaus Fuchs, quien filtró información sobre armas nucleares a la Unión Soviética. Asimismo, me brindó una vinculación más personal con los padres fundadores de mi disciplina, quienes para él habían sido meros mortales.

Por mi parte, yo le enseñé el artículo que podría calificar como el más descabellado que he escrito nunca, el cual analizaba la idea del universo matemático a la que pretende llegar este libro, y dijo que le gustaba. Cuando el editor lo rechazó por «demasiado especulativo» a pesar del informe arbitral positivo, él me animó a recurrir la negativa, y funcionó. Más tarde, escribimos

juntos un artículo para *Scientific American* titulado «100 Years of Quantum Mysteries» [100 años de misterios cuánticos] en el que aspiramos a explicar tanto los universos paralelos cuánticos como la decoherencia con un lenguaje sencillo. Cuando le pregunté si creía de verdad en los universos paralelos cuánticos, me dijo: «Procuro sacar tiempo para creer en ellos los lunes, miércoles y viernes».

Rara vez lloro, pero lo hice en 2008 al enterarme de que John Wheeler había muerto. Realmente me conmovió y me inspiró, y en su funeral quedó patente que muchas personas más compartían mis sentimientos. Durante el acto posterior se dejó el micrófono abierto a disposición de quien se animara a hablar sobre él, y yo dediqué unas palabras a comentar todo lo que había significado para mí. Que si tuviera que reunir todo ello en una sola palabra sería *estímulo*. Que fue un estímulo que alguien tan brillante y célebre manifestara tanta amabilidad y «tratara a todo el mundo por igual», tal como lo expresó otro de los participantes. Que fue un estímulo que me animara a seguir mis sentimientos y trabajar en lo que de verdad me apasiona. Y que la mejor demostración del gran estímulo que había sido para la gente era echar una ojeada a aquella sala para ver cuántas personas extraordinarias habían viajado desde al menos tres continentes para estar allí. La multitud parecía toda una concentración de eminencias de la física.

Una tarde, mientras llevaba a John de regreso a Meadow Lakes, la urbanización para jubilados en la que residía, empecé a hablarle con entusiasmo de una idea que acababa de tener, que sonaba muy descabellada y que llamé *suicidio cuántico*. Llevaba mucho tiempo preguntándome si habría algún experimento capaz de convencernos de que los universos paralelos de Everett son reales, y al fin se me había ocurrido uno.

Por sorprendente que parezca, el experimento requiere instrumentos de baja tecnología muy fáciles de conseguir. Sin embargo, también exige experimentalistas con una entrega excepcional, porque equivale a una versión repetitiva y más rápida del experimento del gato de Schrödinger, en la que el experimentador hace de gato. El aparato es una «pistola cuántica» que dispara dependiendo del resultado de una medición cuántica. En concreto, cada vez que la pistola se acciona, coloca una partícula en una superposición que la sitúa en dos estados al mismo tiempo y por igual (por ejemplo, girando en sentido horario y antihorario), y a continuación mide la partícula. Si la partícula resulta estar en el primero de los dos estados, la pistola lanza un disparo, y en caso contrario emite un audible *clic*. Los detalles del mecanismo para el accionamiento son irrelevantes[45] siempre que se cumpla que el

intervalo temporal entre la medición cuántica y el disparo real sea mucho más corto que la percepción humana normal; digamos, una centésima de segundo.

Supongamos ahora que usted da inicio a este experimento de pistola cuántica en un modo automático que la acciona cada segundo. Con independencia de si usted cree o no en los universos paralelos de Everett, predecirá que oirá una secuencia aparentemente aleatoria de disparos y disparos fallidos como *bum-clic-bum-bum-bum-clic-clic-bum-clic-clic*. Pero, de repente le da por ponerse radical, se lleva el cañón de la pistola a la cabeza y espera. ¿Qué cree usted que oirá a continuación? ¡Pues depende de si los universos paralelos de Everett son reales o no! ¡Si no lo son, cada medición cuántica tendrá un único resultado, así que usted estará definitivamente vivo o muerto después del primer segundo, con un 50 % de probabilidades para cada opción. Así que cabe esperar que oiga tal vez un *clic*, o dos con un poco de suerte y, después, «fin del juego», nada en absoluto. La probabilidad de sobrevivir n segundos asciende a $1/2^n$, así que la posibilidad de durar un minuto es inferior a una entre un trillón (10^{-18}). Sin embargo, si los universos paralelos de Everett son reales, habrá dos universos paralelos después del primer segundo: uno en el que usted vive y otro en el que muere entre sangre esparcida por todas partes. En otras palabras, hay una copia exacta de usted que tiene percepciones tanto antes como después de que se accione la pistola, y como el proceso sucede demasiado deprisa para notarlo, la predicción es que usted habrá oído *clic* con un 100 % de seguridad. Espere un poco más y descubrirá algo sorprendente: en cuanto sitúe la cabeza en la línea de disparo, la secuencia aparentemente aleatoria de *bums* y *clics* se convertirá únicamente en *clic-clic-clic-clic-clic-clic-clic*, etc. Después de diez *clics* llegará a la conclusión de que ha descartado el colapso de la función de onda con un 99,9 % de seguridad, en el sentido de que si de verdad se produjera el colapso de la función de onda, entonces la probabilidad de estar muerto superaría a estas alturas el 99.9 %. Un minuto más tarde, solo admitiría la probabilidad de una entre un trillón de que Everett esté equivocado. Para mitigar cualquier sospecha de que la pistola cuántica esté rota, aparta usted la cabeza de la línea de fuego y descubre que, como por arte de magia, vuelve a disparar de manera intermitente.

En cambio, si usted ya se ha convencido de que Everett tiene razón e invita a una amiga a presenciar el experimento, entonces se producirá un giro en los acontecimientos. Mientras que usted estará vivo en un único universo paralelo, ella seguirá presente en todos ellos, y por lo común lo verá morir

después de unos cuantos segundos. Así que solo conseguiría convencerla de que usted es un científico loco.

A John todo esto le pareció interesante. Le dije que en mi opinión muchos físicos se alegrarían sin duda si un genio omnisciente se les presentara en el lecho de muerte para concederles, como premio a la curiosidad demostrada a lo largo de toda una vida, la respuesta a cualquier interrogante físico de su elección. Pero ¿sentirían la misma alegría si el genio les prohibiera contárselo a alguien más? Tal vez la mayor ironía de la mecánica cuántica sea que si Everett estaba en lo cierto, la situación es análoga a si, cuando usted está a punto de morir, comete repetidamente el suicidio cuántico: puede que la experimentación lo convenza de que los universos paralelos cuánticos son reales[46], pero ¡nunca conseguirá convencer de ello a nadie más!

Desde luego, lograría convencer a sus amistades si realizara el experimento suicida de forma colectiva, por ejemplo, conectando el accionador cuántico a una bomba nuclear, de forma que solo acabe estando en aquellos universos paralelos donde usted y todos sus amigos estén o todos vivos o todos muertos. Pero lo más probable es que después del experimento dejen de ser amigos suyos.

¿Inmortalidad cuántica?

Después de que yo publicara un artículo sobre la idea del suicidio cuántico, la revista *New Scientist* y el diario *The Guardian* sacaron escritos sobre ella que llamaron bastante la atención, y me ha divertido mucho encontrarme esta idea con posterioridad en varios relatos de ciencia ficción. Como ya he dicho, mucha gente suele tener ideas parecidas cuando llega el momento propicio para ellas y, en efecto, más tarde descubrí que otras personas habían seguido líneas de pensamiento parecidas antes que yo, tal vez partiendo del matemático austríaco Hans Moravec, quien comentó esta idea en su libro sobre inteligencia artificial de 1988 titulado *Mind Children*. Sin embargo, al contrario que con otros de mis redescubrimientos previos, con este ejercí cierto impacto porque contribuyó a que la idea trascendiera a un ámbito más amplio.

Enseguida recibí un alud de preguntas interesantes a través del correo electrónico sobre el suicidio cuántico que me llevaron a plantearme más aspectos de sus implicaciones. He aquí mi preferida: ¿Podemos interpretar todos los sucesos potencialmente letales de la naturaleza como experimentos

de suicidio cuántico, de tal modo que cabría esperar una inmortalidad subjetiva? Este interrogante se resuelve con un experimento sencillo: ¡Esperar a ver! Si un buen día después de una larga secuencia de coincidencias improbables en apariencia, se encontrara con que usted es la persona más anciana de la Tierra, ¡ya tendría la respuesta! Tenga en cuenta que no cabe esperar la presencia de *otras* personas de una edad avanzada fuera de lo común, del mismo modo que no puede contar con ver otras personas que vivan mucho si realizan el experimento del suicidio cuántico.

Entonces, ¿qué predicen las leyes de la física, si admitimos que Everett tiene razón y que la función de onda nunca se colapsa? Para que el experimento del suicidio cuántico funcione debe cumplir tres condiciones:

1. El generador de números aleatorios debe ser cuántico, no clásico (determinista), de forma que de verdad usted pase a una superposición de vida y muerte.
2. El dispositivo debe matar (o al menos dejar inconsciente) en menos tiempo del que tardaría una persona en darse cuenta del resultado de la medición cuántica (de otro modo, lograría una versión muy desafortunada de usted que durante un segundo o más sabría que está a punto de morir sin remedio, y todo el efecto quedaría destruido).
3. Tiene que ser prácticamente seguro que el efecto es letal de verdad, y que no solo provoque heridas.

Es evidente que la mayoría de los accidentes y causas comunes de muerte no satisfacen las tres condiciones, lo que induce a pensar que a fin de cuentas usted no se sienta inmortal. En particular y en relación con la segunda condición, en circunstancias normales morir no es un hecho binario en el que se está vivo o muerto, sino que es todo un continuo de estados en los que la consciencia de uno mismo se desvanece de manera progresiva. Si el suicidio cuántico funciona es porque fuerza una transición abrupta. Supongo que a medida que envejezca las células del cerebro me irán fallando (de hecho, ya ha empezado a pasarme…), de forma que la consciencia de mí mismo vaya disminuyendo poco a poco. De este modo, la fase final de la muerte resultará bastante anodina, como la defunción de una ameba.

La tercera condición establece un límite para la duración del experimento del suicidio cuántico en la práctica antes de que acontecimientos fortuitos le salven la vida. Por ejemplo, en mi vecindario se va la luz en promedio una vez cada pocos años, alrededor de una vez cada $10^8 \approx 2^{27}$ segundos. Esto significa que si la pistola cuántica funciona con electricidad de la red en lugar

de usar baterías, habré sobrevivido más de 27 segundos y, después, un corte de suministro interrumpiría el funcionamiento de la pistola porque habrá más universos paralelos en los que yo esté vivo con una pistola desactivada que con una pistola en funcionamiento. Cuanto más tiempo transcurra, más descabelladas serán las casualidades: por ejemplo, si no hay más formas probables de que falle la pistola parecidas a un corte eléctrico, después de unos 68 segundos de experimento, debería esperar estar vivo porque la pistola recibiera el impacto de un meteorito… En la parodia de ciencia ficción *Guía del autoestopista galáctico*[47], de Douglas Adams, aparece una «energía de improbabilidad infinita» que permite experimentar acontecimientos extremadamente improbables. Aunque suena a ciencia ficción pura y dura, no lo es: ¡la pistola cuántica se comporta de este modo a todos los efectos!

La condición 1 me parece especialmente interesante. Imagine que el instrumento empleado para el suicidio no se basara en la aleatoriedad cuántica, sino en algo parecido al lanzamiento de una moneda, lo que en principio permitiría predecir si saldrá cara o cruz, aunque no en la práctica, porque no hemos realizado todos los cálculos sobre el movimiento de la moneda a partir de las condiciones iniciales, etc. Si, en este caso, se partiera de un solo universo paralelo, un segundo después seguiría habiendo un solo universo paralelo, y usted estaría vivo o muerto dependiendo de la posición inicial y del movimiento de la moneda, de modo que no se sentiría subjetivamente inmortal.

Pero ¿y si fuera real el multiverso del nivel I del capítulo 6?; entonces habría de partida una cantidad infinita de universos paralelos en los que usted existiría en estados mentales subjetivamente indistinguibles, pero con pequeñas diferencias imperceptibles en cuanto a la posición inicial y la velocidad de la moneda. Un segundo después habría muerto en la mitad de esos universos pero, con independencia de cuántas veces se repita el experimento, siempre habrá universos en los que usted jamás reciba un disparo. En otras palabras, esta suerte de experimento macabro de suicidio fortuito puede revelar la existencia, no ya de meros universos paralelos del nivel III (cuánticos), sino también de otros universos paralelos en términos más generales.

Ya lo sé. Todo esto suena verdaderamente descabellado. Hágame caso: «No pruebe a hacerlo en casa». Es más, tal como explico en el capítulo 11, ahora estoy convencido de que en realidad no funcionan ni el suicidio cuántico ni la inmortalidad cuántica, porque dependen de manera determinante de algo que no creo que exista en la naturaleza: un continuo

matemático infinitamente divisible. Pero ¿quién sabe? Si un fatídico día del futuro cree que su vida está a punto de terminar, recuerde esto y no se diga «ya no queda nada», porque igual sí queda. Tal vez esté a punto de experimentar en sus propias carnes que sí existen los universos paralelos.

Multiversos unificados

Todos los animales son iguales, pero unos son más iguales que otros.

George Orwell,
Rebelión en la granja, 1945

Me acuciaba una idea que no podía quitarme de la cabeza: ¿habría algún modo de que los multiversos de los niveles I y III fueran en realidad una y la misma cosa? ¿Podrían unificarse al igual que Maxwell había unificado la electricidad y el magnetismo en el electromagnetismo, y Einstein había unificado el espacio y el tiempo en el espaciotiempo? Por un lado, parecían tener naturalezas muy distintas: los universos del nivel I del capítulo 6 residen a gran distancia dentro de nuestro viejo espacio tridimensional, mientras que los universos paralelos del nivel III del presente capítulo pueden estar aquí mismo en lo que respecta a esas tres dimensiones, pero separados de nosotros en un espacio de Hilbert, el espacio abstracto con una cantidad infinita de dimensiones en el que reside la función de onda. Por otra parte, los multiversos del nivel I y del nivel III tienen mucho en común. Jaume Garriga y Aleks Vilenkin habían escrito un artículo en el que mostraban que los universos paralelos del nivel I que tal vez creó la inflación cosmológica contienen las mismas secuencias de sucesos que los universos paralelos cuánticos de Everett, al igual que yo. La figura 8.10 ilustra que si un hecho cuántico hace que ocurran dos sucesos en superposición cuántica, de forma que a efectos prácticos el futuro se separe en dos ramas cuánticas paralelas, entonces el resultado cuántico paralelo del que ya no se es consciente también estará ocurriendo aquí, en esta rama cuántica particular, solo que en un lugar muy distante del espacio.

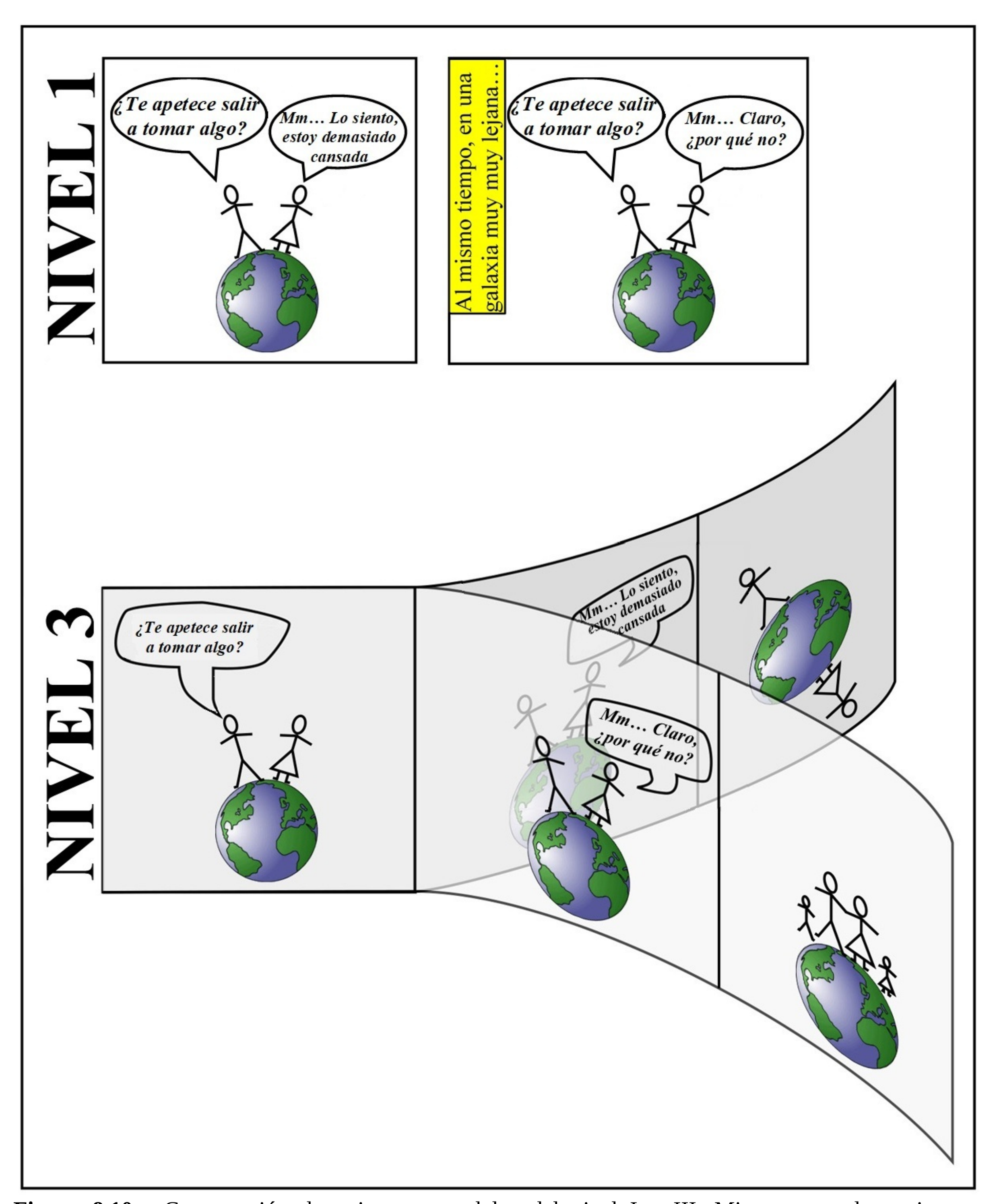


Figura 8.10: Comparación de universos paralelos del nivel I y III. Mientras que los universos paralelos del nivel I se encuentran muy distantes en el espacio, algunos de los del nivel III están aquí mismo, y en ellos los sucesos cuánticos hacen que la realidad clásica se divida y diverja en hilos históricos paralelos. Sin embargo, el nivel III no añade hilos históricos nuevos más allá de los niveles I y II.

Pero había algo más que me inquietaba: Anthony Aguirre. Anthony es uno de mis mejores amigos, y llevamos vidas paralelas en muchos aspectos: ambos procuramos compaginar nuestra profesión con dos hijos pequeños, ambos

estamos obsesionados con los grandes interrogantes, y juntos hemos creado el Foundational Questions Institute (Instituto de Preguntas Fundamentales), fqxi.org, una institución sin ánimo de lucro que financia investigaciones físicas de alto riesgo y alto rendimiento que suelen ahuyentar a los agentes convencionales de financiación. ¿Y con qué me acuciaba Anthony? Él me había preguntado: «¿Será que algunos universos paralelos son más iguales que otros?».

Él quería llegar a que la explicación que di con anterioridad sobre las probabilidades cuánticas en este mismo capítulo funciona de maravilla con resultados con idéntica probabilidad (como el naipe cuántico cuyas posibilidades de caer boca arriba o boca abajo ascendían al 50 % en ambos casos), pero no cuando las probabilidades son desiguales. Por ejemplo, imagine que se toma de partida un naipe con una inclinación muy pequeña, de forma que haya una probabilidad (el cuadrado de la función de onda) de 2/3 de que caiga boca arriba y de 1/3 de que caiga boca abajo. En tal caso la figura 8.2 se mantendrá igual: sigue habiendo $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ resultados después de cuatro intentos, y lo más habitual será que la carta caiga boca arriba el 50 % de las veces, no 2/3 de ellas. La forma en que Everett salvaba la situación y, sin embargo, conseguía predecir una probabilidad de 2/3 a partir de ello consistía en afirmar que algunos de esos resultados tenían una medida de existencia mayor que otros y que, en particular, esa medida de existencia podía calcularse como el cuadrado de la función de onda. Aquello funcionó, y muchos autores han aportado desde entonces argumentos más elaborados para justificar por qué lo correcto es elevar al cuadrado la función de onda; sin embargo, Anthony me convenció de que aquello era una mancha indeseable dentro de la elegante argumentación de Everett. La gente solía preguntarme si creía que los universos paralelos de Everett son reales. Y quedaba poco convincente responder: «Sí, pero… esto… eh… unos son más reales que otros».

En marzo de 2008, Anthony me comentó una idea (que explicaré en un momento) para una posible solución que le había sugerido su antiguo profesor de Harvard David Layzer, y pasamos dos horas apasionantes en una cafetería de Belmont garabateando símbolos matemáticos en el reverso de una servilleta[48], aunque fue en vano. No conseguimos hacer los cálculos. Pero tampoco fui capaz de olvidarme de la idea. Dos años más tarde empecé a obsesionarme con aquello otra vez y encontré un artículo de 1968 de Jim Hartle, experto en teoría de la gravitación cuántica, en el que creí ver otra ficha del rompecabezas. Sin embargo, al sentarme a altas horas de la noche

del 6 de marzo de 2010 en mi piso de Winchester, no logré que las piezas encajaran entre sí. Frustrado, decidí pensar dando un paseo por la ciudad. Para mi gran sorpresa, cinco minutos después de tomar el aire invernal, ¡al fin funcionó! De pronto caí en la manera de resolver ambos problemas de un plumazo: unificando los dos niveles de multiversos y entendiendo las probabilidades desiguales. Estuve despierto hasta alrededor de las tres de la madrugada y pasé casi todo el día siguiente en aquel fantástico estado como de trance que solo conoce quien lo experimenta. Sentí que era uno de los alumbramientos más fascinantes que había tenido desde el redescubrimiento de la decoherencia diecinueve años antes, y no pude pasar a otras cosas hasta que mecanografié el esquema de un artículo para Anthony.

La figura 8.11 ilustra la idea central. Imagine que está usted a punto de realizar el experimento de los naipes cuánticos con la carta ligeramente ladeada para que caiga boca arriba y ganar 100 dólares con una probabilidad de 2/3. Según la concepción de la vieja escuela (en la parte izquierda de cada rectángulo de la figura 8.11), al principio solo hay una copia de usted, y después del experimento habrá o una o dos, dependiendo de si la función de onda se colapsa o no: si la interpretación de Copenhague es correcta, habrá un resultado definido e inequívoco generado al azar, mientras que si es Everett el que está en lo cierto, habrá dos universos paralelos, cada uno de los cuales contendrá una sola copia de usted: uno en el que estará feliz por haber ganado y otro en el que estará triste.

Supongamos ahora que existe el multiverso del nivel I del capítulo 6, tal como induce a pensar la cosmología moderna. Eso significa que una cantidad infinita de copias indistinguibles de usted está a punto de realizar el mismo experimento en otros planetas muy, muy lejanos dentro del espacio, lo que se ilustra en la figura mediante la banda de caras neutras. En mis cálculos aplicaba la ecuación de Schrödinger a la función de onda que describe todo el conjunto de partículas que conforman todas esas copias de usted y del experimento.

¿Qué acaba sucediendo? Si la función de onda se colapsa, entonces se obtiene un solo resultado aleatorio para todo el espacio infinito (el multiverso del nivel I), un resultado que establece que usted estará feliz en 2/3 de los planetas, y triste en 1/3 de ellos, esto no tiene nada de sorprendente. Si Everett tiene razón en que no se produce el colapso, el resultado para todo el espacio infinito consiste en una superposición cuántica de estados diferentes, estados de felicidad en algunos mundos del multiverso del nivel III y de tristeza en otros. Pero la clave está aquí: todos esos estados distribuidos por el espacio

acaban siendo indistinguibles entre sí, ¡y usted está feliz exactamente en 2/3 de ese número infinito de mundos! Cualquier secuencia finita de planetas con resultados de felicidad o tristeza que se halle dentro de uno de esos estados se encuentra también en cualquier otro lugar del espacio dentro de alguno de los demás estados. Tal vez le parezca que también debería

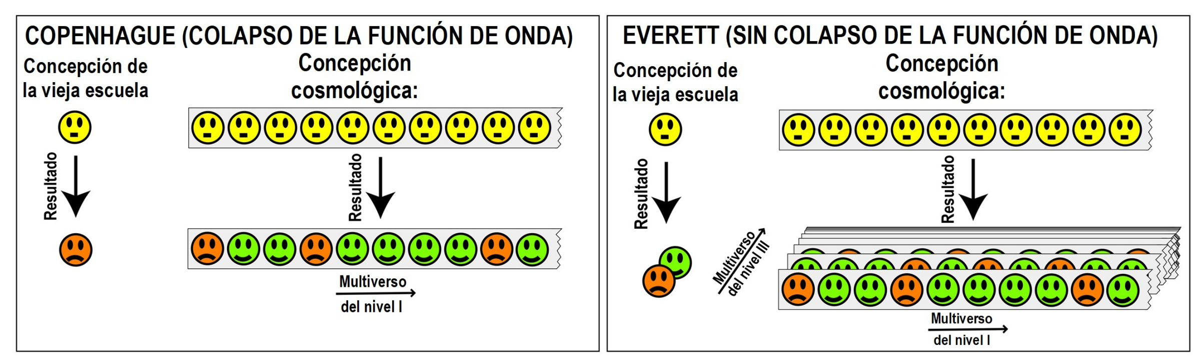


Figura 8.11: De qué manera están unificados los multiversos del nivel I y del nivel III. Cada círculo representa un planeta en el que usted ha apostado dinero a que el naipe cuántico caerá boca arriba. Antes de que se produzca el resultado, usted se encuentra en un estado anímico neutro; después está o bien feliz por haber ganado, o bien triste por perder. La carta siempre parte de una posición ligeramente inclinada, porque así espera ganar con una probabilidad de 2/3. Todos los planetas distan mucho unos de otros, digamos, un gúgloplex de metros en varias direcciones, pero se representan alineados unos junto a otros para ilustrar los puntos cruciales.

haber diferencias entre unos estados espaciales y otros, como por ejemplo que debería haber uno en el que usted estuviera feliz en todos sus planetas. Sin embargo, al aplicar la ecuación de Schrödinger y las matemáticas del espacio de Hilbert, logré demostrar que la función de onda que se obtiene en realidad equivale a una mera superposición de infinitos estados indistinguibles. A Anthony y a mí esto nos sorprendió por diversas razones.

En primer lugar, el gran debate sobre si la función de onda se colapsa concluye con un enorme anticlímax: ¡simplemente es irrelevante! La figura 8.11 ilustra que, con independencia de si Everett está o no en lo cierto, usted está feliz en 2/3 de los planetas. De hecho, ambos bandos del debate sobre el colapso salen un poco mal parados. La interpretación de Copenhague introdujo el controvertido colapso para librarse de los molestos universos paralelos y obtener un resultado único pero, tal como se ve en la figura, ya no nos sirve: hasta habiendo colapso se siguen obteniendo universos paralelos con ambos resultados. Los universos paralelos del nivel III (cuánticos) eran el rasgo distintivo de la interpretación de Everett, pero en la figura se ve que los podemos ignorar sin ningún riesgo, porque todos son indistinguibles. En este sentido, los multiversos del nivel I y del nivel III están unificados: en cuanto haya un espacio infinito con un multiverso del nivel I podemos ignorar todos sus universos paralelos del nivel III, puesto que en la práctica todos son

copias idénticas. Quizá también pueda unificarse el nivel III con el nivel II, pero aún no hemos logrado demostrarlo.

En segundo lugar, la figura 8.11 ilustra el origen de las probabilidades desiguales al traer los múltiples mundos de Everett a nuestro viejo espacio tridimensional: los distintos resultados no solo están ocurriendo en algún otro lugar de ese espacio matemático de Hilbert difícil de concebir, sino que también se dan en este espacio nuestro que escudriñamos con telescopios. Aquí la clave radica en que después de que la carta haya llegado al suelo y antes de que usted abra los ojos y la mire, no hay manera alguna de saber cuál de sus numerosas copias es usted, porque todas ellas se perciben subjetivamente indistinguibles hasta ese instante. Por tanto, debe usted considerarse como un miembro aleatorio de este conjunto de copias. Como sabe que 2/3 de ellas verán la carta boca arriba cuando abran los ojos, interpretará lo que vea como algo fortuito, con 2/3 de probabilidades de ver la carta boca arriba. Esto es análogo a la manera en que los nobles franceses introdujeron en su origen el concepto de probabilidad para optimizar sus estrategias de juego: si lo único que sabe durante un juego es que se encuentra en una situación idéntica a muchas otras igual de probables (correspondientes a las diferentes maneras en que se repartan las cartas, por ejemplo), dirá que su probabilidad de ganar asciende sencillamente a la fracción de todas las situaciones en las que usted gana.

En tercer lugar, esto nos permitió proponer lo que convinimos en llamar *interpretación cosmológica de la mecánica cuántica*. Con ella interpretamos que la función de onda de un objeto no describe algunos conjuntos imaginarios de posibilidades de lo que podría estar haciendo el objeto, sino más bien el conjunto espacial real de copias idénticas del objeto que existe en nuestro espacio infinito. Es más, la incertidumbre cuántica que se experimenta refleja tan solo la incapacidad para ubicarse dentro del multiverso del nivel I, es decir, para saber cuál de las infinitas copias que hay de usted en el espacio es la que tiene sus percepciones subjetivas concretas.

En algunas materias existe la costumbre de nombrar a los coautores de los artículos científicos por orden alfabético. En cosmología, en cambio, lo habitual es que el orden de los autores refleje cuál de ellos ha aportado más al artículo. En la mayoría de los casos es bastante obvio quién ha realizado la mayor parte del trabajo, pero esta vez fue especialmente difícil de dilucidar. En el momento en que estuve preparado para presentar el artículo para su publicación, tanto Anthony como yo le habíamos dedicado grandes esfuerzos y habíamos realizado aportaciones de una relevancia equivalente. Tuvimos

una conversación telefónica muy divertida en la que ambos valoramos las aportaciones del otro al tiempo que rehuíamos con obstinación ofrecerle al otro que su nombre figurara en primer lugar. Al final propuse una solución que nos gustó a ambos: decidir el orden de aparición con un generador cuántico de números aleatorios. En este universo en particular, él figura como el primer autor (**http://arxiv.org/pdf/10081066.pdf**), pero si nuestro artículo es correcto, yo aparezco como primer autor no ya en la mitad de los universos paralelos del nivel III en los que aplicamos este procedimiento, sino también en la mitad de los universos paralelos del nivel I.

En 2010, Aleks Vilenkin me invitó a dar una charla sobre este artículo en Tufts, y al igual que durante la conferencia que menciono al comienzo del capítulo 5, Alan Guth se encontraba entre los asistentes. Me asaltaron muchos recuerdos de la cabeza de Alan desplomándose contra su pecho quince años atrás, y procuré mentalizarme para lo inevitable, puesto que no recordaba ni una sola conferencia en la que no se hubiera dormido. Y entonces ocurrió un milagro que representó el mejor apoyo que podía recibir nuestro artículo, y la cúspide de mi carrera científica: ¡Alan permaneció despierto durante toda mi intervención!

Puntos de vista: ¿muchos mundos o muchas palabras?

Entonces ¿qué habría que hacer con todo este tinglado cuántico? ¿Deberíamos creer en el colapso de la función de onda o en universos paralelos cuánticos? Aunque cabría afirmar que la mecánica cuántica es la teoría física más satisfactoria que se ha inventado jamás, el debate secular sobre cómo encajarla en una representación congruente de la realidad física no da señales de remitir. Con los años ha surgido un verdadero zoológico de interpretaciones de lo que está pasando, como la estadística, la de Copenhague, la instrumental, la hidrodinámica, la de la consciencia, la de Bohm, la de la lógica cuántica, la de la pluralidad de mundos, la de la mecánica estocástica, la de la pluralidad de mentes, las historias coherentes, el colapso objetivo, la transaccional, la modal, la existencial, la relacional, la de Montevideo y la cosmológica[49]. Es más, distintos defensores de cada interpretación particular discrepan a menudo acerca de los detalles de su definición. De hecho, ni siquiera existe consenso con respecto a cuáles deberían denominarse interpretaciones…

Tal vez le parezca que si los expertos aún están discutiendo esto un siglo después de que se descubriera la mecánica cuántica y sin ningún consenso a la vista, lo más probable es que continúen haciéndolo durante un siglo más. Sin embargo, el contexto global del debate ha variado de tres formas distintas y cruciales en relación con la teoría, la cosmología y la tecnología, lo que conlleva cambios sociológicos que me parecen bastante interesantes.

En primer lugar y tal como ya hemos visto, los descubrimientos teóricos de Everett, Zeh y otros han revelado que hasta eliminando el controvertido postulado del colapso de la función de onda y quedándonos tan solo con el esqueleto desnudo de la mecánica cuántica donde siempre rige la ecuación de Schrödinger, conservamos la *percepción* subjetiva de que la función de onda se colapsa cuando realizamos observaciones, de acuerdo con todas las reglas pertinentes de la probabilidad, y seguimos felizmente ajenos a cualquier universo paralelo cuántico.

En segundo lugar, los hallazgos cosmológicos expuestos en los capítulos 5 y 6 apuntan a que seguiríamos atascados con los universos paralelos aunque Everett estuviera equivocado. Es más, ya hemos visto que esos universos paralelos del nivel I se funden con elegancia con los cuánticos.

En tercer lugar, un avance de peso en teoría de cuerdas que se conoce como correspondencia AdS/CFT ha colapsado el propio soporte de la idea de que la gravitación cuántica colapsa de algún modo la función de onda. Los detalles de ese acrónimo no tienen ninguna importancia para nuestra exposición: el punto clave es que se ha descubierto una transformación matemática que demuestra que ciertas teorías cuánticas de campos con gravitación se pueden reinterpretar como otras teorías cuánticas de campos sin gravitación. Está claro que la gravitación no causa el colapso de la función de onda, ya que la mera presencia de la gravitación es tan solo una cuestión interpretativa.

En cuarto lugar, experimentos cada vez más precisos han anulado muchas tentativas de explicar de manera convincente la rareza cuántica. Por ejemplo, ¿podría sustituirse la aparente aleatoriedad cuántica por alguna clase de cantidad desconocida contenida en el interior de las partículas, las llamadas variables ocultas? El físico irlandés John Bell reveló que, en tal caso, cantidades que podrían medirse mediante ciertos experimentos complejos discreparían inevitablemente de las predicciones cuánticas usuales. Después de muchos años, la tecnología avanzó al fin lo suficiente como para realizar esos experimentos, y con ellos se descartó la explicación de las variables ocultas.

¿Podría ocurrir que la ecuación de Schrödinger precisara una pequeña corrección que aún no hayamos descubierto, pero que haga que las superposiciones cuánticas se desmoronen con objetos lo bastante grandes? En la época en que nació la mecánica cuántica había muchos físicos que, en efecto, creían que esta disciplina solo funcionaría a una escala atómica. ¡Bueno, pues ya no! El sencillo experimento de la interferencia con doble rendija (figura 7.7), aclamado por Feynman como el padre de todos los efectos cuánticos, se ha repetido con éxito con objetos mayores que partículas elementales individuales: átomos, moléculas pequeñas y hasta la molécula de fullereno formada por 60 átomos de carbono con forma de balón de fútbol. Mientras realizaba mis estudios de posgrado, le pregunté a mi compañero de clase Keith Schwab si creía viable demostrar de manera experimental que un objeto macroscópico estaba en dos sitios a la vez. Curiosamente, dos décadas después, dirige un laboratorio en Caltech donde hacen justo eso con una barra de metal que contiene muchos miles de millones de átomos. De hecho, su colega de Santa Bárbara Andrew Cleland ya lo ha conseguido con una paleta metálica lo bastante grande como para observarla a simple vista. El grupo de Anton Zeilinger de Viena ha empezado incluso a pensar en hacerlo con un virus. Si a modo de experimento mental imaginamos que ese virus cuenta con alguna suerte de consciencia primitiva, la interpretación de los múltiples mundos de Everett parece inevitable: la extrapolación a superposiciones relacionadas con otros seres sensibles como los humanos tendría entonces un carácter meramente cuantitativo, más que cualitativo. El grupo de Zeilinger demostró asimismo que los rasgos cuánticos de los fotones contrarios a la intuición persistían mientras se desplazaban 89 kilómetros por el espacio, una distancia nada microscópica. Por eso creo que el veredicto experimental ya se ha emitido: el mundo *es* raro, y no queda más remedio que aprender a vivir con ello.

De hecho, mucha gente ha alentado la idea de la rareza cuántica por razones no ya filosóficas, sino económicas: esta rareza puede brindar nuevas tecnologías útiles. Según una estimación reciente, más de la cuarta parte del producto interior bruto de Estados Unidos de América se basa en la actualidad en inventos que han sido posibles gracias a la mecánica cuántica, desde láseres hasta chips de ordenadores. En efecto, tecnologías incipientes como la criptografía cuántica y la computación cuántica explotan expresamente el multiverso del nivel III, y funcionan tan solo si la función de onda no se colapsa.

Estos avances en la teoría, la cosmología y la tecnología han inducido un cambio notable de mentalidad. Cuando imparto alguna conferencia, me gusta conocer la opinión del público que acude a oírme. Estas son las respuestas que recibí cuando pregunté a los asistentes con qué interpretación de la mecánica cuántica se sentían más identificados, primero en la conferencia sobre mecánica cuántica que di en 1997 en la Universidad de Maryland (UMBC), y después en la charla que di en 2010 en el Departamento de Física de Harvard:

Aunque estos sondeos fueron muy informales y poco científicos y es evidente que no analizan una muestra representativa de todos los físicos, indican sin embargo un cambio notable de opinión: tras reinar sin competencia durante varias décadas, la interpretación de Copenhague cayó por debajo del 30 % en 1997 y hasta el 0 % (¡!) en 2010. En cambio, después de plantearse en 1957 e ignorarse casi por completo durante alrededor de una década, la interpretación de los múltiples mundos de Everett soportó veinticinco años de duras críticas y burlas ocasionales para pasar a ocupar el primer puesto de la lista en 2010. También debemos señalar que hay una fracción considerable de indecisos, lo que sugiere que el debate de la mecánica cuántica aún está en plena efervescencia.

Interpretación	**Maryland, 1997**	**Harvard, 2010**
Copenhague	1	30
Everett	8	16
Bohm	4	0
Historias coherentes	4	2
Dinámicas modificadas	1	1
Ninguna de las anteriores/indecisos	18	16
Total de votos	48	35

El etólogo austríaco Konrad Lorenz señaló que los descubrimientos científicos relevantes atraviesan tres fases: primero se ignoran por completo, después reciben ataques iracundos y, por último, se dejan de lado por ser bien conocidos. El sondeo parece indicar que después de pasar la década de 1960 en la primera fase, los universos paralelos de Everett se han desplazado ahora hasta algún lugar intermedio entre las fases 2 y 3.

Para mí ese desplazamiento implica que ha llegado la hora de actualizar los libros de texto cuánticos para que hablen de la decoherencia (muchos aún no la consideran) y para dejar claro que es mejor considerar la interpretación de Copenhague como la *aproximación de Copenhague*: aunque lo más

probable es que la función de onda no se colapse, se trata de una aproximación muy útil para efectuar los cálculos como si se colapsara cuando se realiza una observación.

Todas las teorías físicas se dividen en dos partes: ecuaciones matemáticas y palabras que explican su significado. Aunque más arriba relacioné el nombre de más de una docena de interpretaciones de la mecánica cuántica, muchas de ellas difieren tan solo en la parte de las «palabras». Para mí lo más interesante es la parte matemática y, en particular, si las matemáticas más simples de todas (la ecuación de Schrödinger sin ninguna excepción) son suficientes. De momento no hay ni un solo indicio experimental en contra, pero muchas de las interpretaciones cuánticas incluyen una parte extensa de «palabrería» para no tener que hablar de universos paralelos. Así que la elección de la interpretación preferida por usted dependerá en realidad de qué le moleste más: si una profusión de mundos o una profusión de palabras. Cuando me llegó el momento de escribir un artículo para las actas del congreso de Maryland de 1997, lo titulé «The Interpretation of Quantum Mechanics: Many Worlds or Many Words?» [La interpretación de la mecánica cuántica: ¿muchos mundos o muchas palabras?[50]] con la intención de provocar a algunos de mis colegas. Esperaba que me acribillaran a correos electrónicos iracundos, pero debo reconocer que, aunque los considero equivocados en lo que respecta a mecánica cuántica, tienen un gran sentido del humor…

En el capítulo 7 comentamos que todo consiste en partículas, y que estas son en cierto sentido puros objetos matemáticos. En este capítulo hemos visto que en la mecánica cuántica hay algo que podría considerarse aún más fundamental: la función de onda y ese lugar de infinitas dimensiones llamado espacio de Hilbert donde ella reside. Las partículas se crean y se destruyen y pueden estar en varios sitios a la vez. En cambio hay, hubo y siempre habrá una sola función de onda, y ella es el objeto que se mueve por el espacio de Hilbert tal como dicta la ecuación de Schrödinger. Pero si la realidad física última se corresponde con la función de onda, ¿qué clase de ente es una función de onda? ¿En qué consiste? ¿En qué consiste el espacio de Hilbert? Hasta donde sabemos, no consisten en nada: ¡Parecen ser puros objetos matemáticos! De modo que, una vez más, cuando intentamos seguir ahondando en busca de la realidad física subyacente, nos topamos con signos de que la propia roca madre es pura matemática. Retomaremos esta idea de manera mucho más extensa en el capítulo 10.

SUMARIO

- En la teoría cuántica con las matemáticas más simples, hay algo más fundamental que nuestro espacio tridimensional y las partículas que contiene: la función de onda y el lugar de infinitas dimensiones, llamado espacio de Hilbert, donde ella reside.
- En esta teoría, las partículas se crean y se destruyen y pueden estar en varios sitios a la vez, pero hay, hubo y siempre habrá una sola función de onda, y se mueve por el espacio de Hilbert tal como establece la ecuación de Schrödinger.
- Esta teoría cuántica con la máxima simpleza matemática, en la que siempre rige la ecuación de Schrödinger, predice la existencia de universos paralelos en los que usted vive innúmeras variaciones de su vida.
- Asimismo implica que la aleatoriedad cuántica es una ilusión causada por la clonación cuántica.
- No hay nada cuántico en la aleatoriedad aparente, la cual se da incluso si se procede a la clonación clásica.
- Esta teoría cuántica de mayor sencillez matemática también predice un efecto censor llamado decoherencia que nos oculta la mayor parte de esa rareza mediante la imitación del colapso de la función de onda.
- La decoherencia se da constantemente en el cerebro, lo que refuta las insinuaciones populares acerca de la «consciencia cuántica».
- Este multiverso cuántico está unificado con el multiverso espacial del capítulo 6, de forma que la función de onda de un sistema describe sus copias infinitas por todo el espacio, y la incertidumbre cuántica refleja el desconocimiento de qué copia en concreto se está observando.
- Si residimos en un espacio uniforme infinito como el del modelo cosmológico estándar, carece de relevancia si la función de onda se colapsa en última instancia o no: todos los múltiples mundos de Everett son indistinguibles, y el colapso no evita que se den todos los resultados cuánticos.
- Podría decirse que el multiverso cuántico nos hace subjetivamente inmortales, en cuyo caso acabaremos viéndonos como la persona más vieja del planeta, y esto tal vez ni siquiera requiera mecánica cuántica, sino tan solo el multiverso del nivel I en un espacio infinito. Pero lo cierto es que no lo creo, tal como explicaré en el capítulo 11.
- La función de onda y el espacio de Hilbert, que cabría afirmar que constituyen la realidad física más fundamental, son puros objetos

matemáticos.

Tercera parte
VUELTA ATRÁS

9
Realidad interior, realidad exterior y realidad consensuada

Lo dulce existe por convención; lo amargo, por convención; el color, por convención; [solo] los átomos y el vacío existen de verdad.

Demócrito, *ca.* 400 a. de C.

«¡Oh, nooooo! ¡Mi maleta!».

Ya habían abierto el embarque para mi vuelo de Boston a Filadelfia, a donde me dirigía para colaborar en un documental de la BBC sobre Hugh Everett, cuando me di cuenta de que no llevaba la maleta en la mano. Volví corriendo al control de seguridad.

—¿Han visto un bolso negro con ruedas por aquí?

—No —respondió el guardia.

—¡Pero si está ahí, esa es mi maleta, esa de ahí!

—Esa maleta no es negra —respondió el guardia—, es verde oscuro.

Hasta entonces no había reparado en lo mal que distingo los colores, y fue bastante aleccionador caer en la cuenta de que muchas cosas que había dado por supuestas sobre la realidad (y mi vestuario) eran completamente erróneas. ¿Cómo pude confiar en lo que me decían los sentidos sobre el mundo exterior? Y si no eran de fiar ¿cómo podía esperar saber algo con seguridad acerca de la realidad exterior? Al fin y al cabo, todo lo que sabía sobre el mundo exterior y estos sentidos tan poco fiables lo había conocido a través de los propios sentidos. Esto me sitúa en las mismas condiciones epistemológicas de inseguridad que un prisionero que lleve toda la vida confinado en solitario y que solo tenga información sobre el mundo exterior y su inconfidente carcelero a través de lo que le ha contado el propio carcelero. Y, de manera más general, ¿cómo puedo confiar en lo que me dicen mis percepciones conscientes sobre el mundo si no sé cómo funciona la mente?

Filósofos de todos los tiempos han abordado con elocuencia este dilema elemental, entre ellos grandes titanes como Platón, René Descartes, David

Hume e Immanuel Kant. Sócrates dijo: «Sólo sé que no sé nada». Entonces, ¿cómo podemos avanzar en nuestro empeño por conocer la realidad?

Hasta ahora a lo largo de este libro hemos recurrido a la física para explorar la realidad exterior, con una visión de campo amplio para el macrocosmos superior a las galaxias y una visión de campo estrecho para el microcosmos subatómico con la finalidad de comprender las cosas en términos de sus elementos constitutivos esenciales, como las partículas elementales. Sin embargo, lo único de lo que tenemos un conocimiento directo son los *qualia*, los elementos constitutivos esenciales de la percepción humana consciente[51], ejemplificada en la rojez de una rosa, el sonido de unos platillos, el olor de un filete, el sabor de una mandarina o el dolor de un pinchazo. Entonces, ¿no habría que desentrañar también la consciencia para comprender por completo la física? Yo solía responder que sí, convencido de que nunca resolveríamos la esquiva «teoría del todo» de la realidad física exterior si antes no esclarecíamos la distorsionadora lente mental a través de la cual la percibimos. Pero ahora he cambiado de idea, y en este breve capítulo a modo de interludio explico por qué.

Realidad exterior y realidad interior

Quizá usted esté pensando: *Vale, Max, pero yo no sufro daltonismo. Y ahora mismo estoy mirando la realidad exterior con mis propios ojos, y tendría que estar paranoico para pensar que no es tal como la veo*. Pero, por favor, pruebe a hacer estos experimentos:

> **Experimento 1:** Gire la cabeza varias veces de izquierda a derecha.
> **Experimento 2:** Gire los ojos varias veces de izquierda a derecha sin mover la cabeza.

¿Ha notado que la primera vez la realidad exterior parecía desplazarse, mientras que la segunda vez parecía estar quieta aunque en ambos casos se movieran los globos oculares? Esto demuestra que lo que ve el ojo de la mente no es la realidad exterior, ¡sino un modelo de la realidad que alberga el cerebro! Si observara la imagen grabada por una cámara de vídeo en movimiento, la vería moverse con claridad en el experimento 1. Pero los ojos son como una cámara de vídeo biológica, así que el experimento 2 revela que la consciencia no percibe las imágenes exactas que se forman en la retina,

sino que, tal como han estudiado en gran detalle los neurocientíficos, la información grabada en la retina se procesa de maneras muy complejas y se usa para actualizar constantemente un modelo elaborado del mundo exterior que guardamos en el cerebro. Vuelva a mirar al frente y verá que, gracias a este avanzado procesamiento de la información, el modelo que tenemos de la realidad es tridimensional, a pesar de que las imágenes brutas que se forman en la retina son bidimensionales.

Yo no tengo interruptor de la luz junto a la cama, así que suelo echar un vistazo a la habitación y a todos los obstáculos desperdigados por el suelo antes de apagar la luz, y luego ando a oscuras hasta la cama. Inténtelo usted: deje de leer, levántese, mire a su alrededor y dé unos cuantos pasos con los ojos cerrados. ¿Ve/nota cómo se mueven los objetos de la estancia con relación a usted? Está actualizando el modelo de la realidad que tiene en el cerebro, esta vez usando información procedente del movimiento de las piernas, no la procedente del movimiento de los ojos. El cerebro actualiza sin cesar el modelo de la realidad empleando cualquier información útil que consiga obtener, también a través del oído, el tacto, el olfato o el gusto.

A este modelo de la realidad lo llamaremos *realidad interior*, porque es la percepción subjetiva que tenemos de la realidad exterior desde el punto de vista interno de la mente. Esta realidad es interna también en cuanto a que existe tan solo internamente para cada cual: la mente cree que ve el mundo exterior, pero lo cierto es que tan solo ve un modelo de la realidad que hay dentro de la cabeza (un modelo que a su vez escudriña sin cesar lo que hay fuera del cerebro mediante procesos muy elaborados aunque automáticos de los que no somos conscientes en absoluto).

Es crucial que no mezclemos esta realidad interior con la realidad exterior que escudriña, porque son muy diferentes. La realidad interior del cerebro es como el salpicadero de un coche: un práctico resumen con la información más útil. Igual que el salpicadero informa de la velocidad, la cantidad de gasolina, la temperatura del motor y otras cosas útiles que deben tenerse en cuenta durante la conducción, el salpicadero/modelo de realidad del cerebro nos informa de la velocidad y la posición, la cantidad de hambre, la temperatura del aire, lo más destacado del entorno y otras cosas útiles que deben tenerse en cuenta durante el funcionamiento del cuerpo humano.

La verdad, toda la verdad y nada más que la verdad

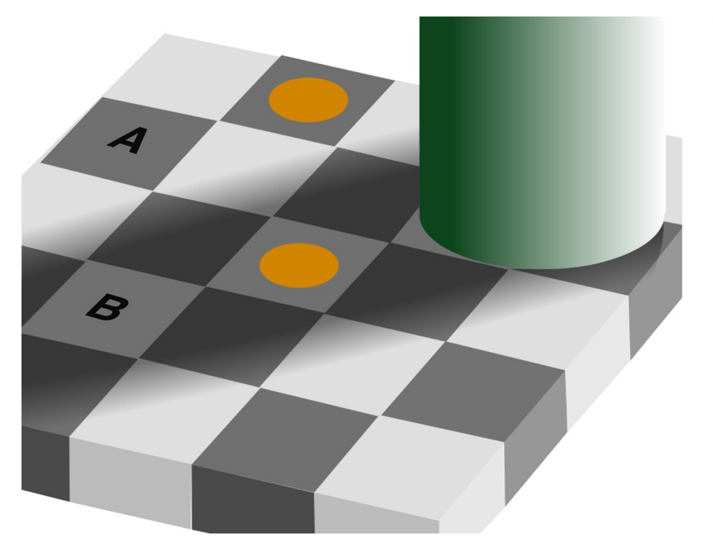
Una vez el salpicadero del coche falló y me mandó al taller con el indicador de «REVISIÓN DEL MOTOR» encendido a pesar de que todo estaba en orden. De igual manera, hay muchas formas de que el modelo de realidad de cada persona falle, difiera de la verdadera realidad exterior y produzca ilusiones (percepción errónea de cosas que existen en la realidad exterior), omisiones (no percepción de cosas que sí existen en la realidad exterior) y alucinaciones (percepción de cosas que no existen en la realidad exterior). Si nos comprometemos bajo juramento a decir la verdad, toda la verdad y nada más que la verdad, debemos tener en cuenta que nuestra percepción puede infringir esas tres consignas mediante ilusiones, omisiones y alucinaciones, respectivamente.

Así que, en términos metafóricos, el incidente de la «REVISIÓN DEL MOTOR» fue como una alucinación del coche, o la experimentación de un dolor fantasma. Hace poco descubrí que mi coche también sufre una ilusión: la lectura del cuentakilómetros le hace pensar que siempre viaja tres kilómetros por hora más rápido de su velocidad real. Esto no es nada malo comparado con la larga lista de ilusiones humanas descubiertas por los científicos cognitivos, las cuales aquejan todos los sentidos y distorsionan nuestra realidad interior. Si tiene la versión en color (no en blanco y negro) de esta figura, es probable que vea el círculo inferior del recuadro de la izquierda de color naranja y el círculo superior con cierta tonalidad marrón. La figura 9.1 muestra dos ejemplos de ilusiones ópticas en las que el sistema visual humano crea una realidad interior distinta de la exterior. En la realidad exterior, la luz de ambos círculos tiene unas características idénticas, con una longitud de onda que ronda los 600 nanómetros. Si un foco lanzara un haz de esa luz, sería luz naranja. ¿Y el color marrón? ¿Ha visto usted alguna vez un foco o un puntero láser que emita un haz de luz marrón? Nunca lo verá, porque ¡no existe eso de la luz marrón! El color marrón no existe en la realidad exterior, sino solo en la realidad interior humana: solo es lo que percibimos nosotros cuando vemos luz naranja tenue contra un fondo más oscuro.

A veces me entretengo comparando cómo se cuenta la misma noticia en las ediciones virtuales de MSNBC, Fox News, la BBC, Al Jazeera, *Pravda* y otros medios de comunicación. Considero que cuando se trata de contar la verdad, toda la verdad y nada más que la verdad, las mayores diferencias en su forma de retratar la realidad radican en el segundo de esos tres cometidos: lo que se omite. Creo que con los sentidos ocurre lo mismo: aunque pueden generar alucinaciones e ilusiones, son las omisiones lo que más pesa en la

discrepancia entre las realidades interior y exterior. Mi sistema visual omitió la información que diferencia una maleta negra de una verde oscuro, pero aunque no padeciera daltonismo, me seguiría perdiendo la inmensa mayoría de la información que porta la luz. Cuando me enseñaron en la escuela primaria que todos los colores de la luz se pueden crear mezclando tres colores primarios, rojo, verde y azul, pensé que ese número tres revela algo fundamental sobre la realidad exterior. Pero estaba equivocado: solo nos informa de las omisiones que comete la vista humana. En concreto, indica que la retina tiene tres tipos de células, llamadas conos, que reciben los miles de números que se pueden medir en el espectro de la luz (véase la figura 2.5 del capítulo 2) y retienen tan solo tres de ellos, los correspondientes a la intensidad media de la luz en tres rangos amplios de longitudes de onda.

Es más, las longitudes de onda de la luz fuera de la estrecha banda que abarca desde 400 hasta 700 nanómetros son absolutamente imperceptibles para nuestra vista, y nos llevamos una buena sorpresa cuando los detectores inventados por humanos revelaron que la realidad exterior es mucho más rica de lo que alcanzamos a percibir y está repleta de ondas de radio, microondas, rayos X y rayos gamma. Y la vista no es el único sentido causante de omisiones: tampoco podemos oír los gritos de ultrasonidos que emiten los ratones, murciélagos y delfines; desconocemos la mayoría de los sutiles olores que imperan en la realidad interior olfativa de los perros, y muchas cosas más. Aunque algunas especies animales captan más información visual, auditiva, olfativa, gustativa o relacionada con cualquier otro sentido que los humanos, todas ellas desconocen el universo subatómico, el cosmos salpicado de galaxias y la energía y la materia oscuras que, como vimos en el capítulo 4, conforman hasta el 95 % de nuestra realidad exterior.



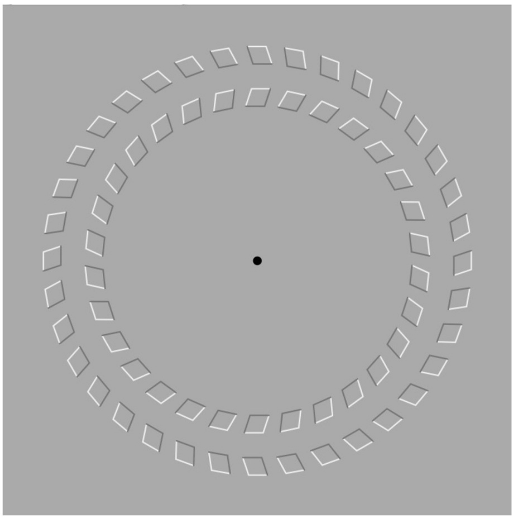


Figura 9.1: Ilusiones ópticas. En el panel de la izquierda, los cuadrados *A* y *B* tienen el mismo tono de gris, y los dos círculos tienen un color idéntico. En el panel de la derecha verá moverse los círculos si dirige la vista al punto negro del centro y al mismo tiempo desplaza la cabeza hacia delante y hacia atrás.

Realidad consensuada

En las dos primeras partes de este libro hemos visto que este mundo físico nuestro se deja describir especialmente bien mediante ecuaciones matemáticas, lo que alienta la esperanza de que algún día se descubran ecuaciones para una «teoría del todo» que describan a la perfección nuestra realidad exterior a todas las escalas. El triunfo definitivo de la física consistiría en partir de la realidad exterior «a vista de pájaro», es decir, desde la perspectiva de una matemática que estudiara esas ecuaciones (lo ideal sería que fueran lo bastante simples como para caber en su camiseta) y que de ellas infiriera su realidad interior, la percepción subjetiva que tiene de ella desde su «vista de rana» dentro de la realidad exterior. Es evidente que para eso haría falta un conocimiento detallado de cómo funciona la consciencia, incluidas las ilusiones, omisiones, alucinaciones y otras complicaciones.

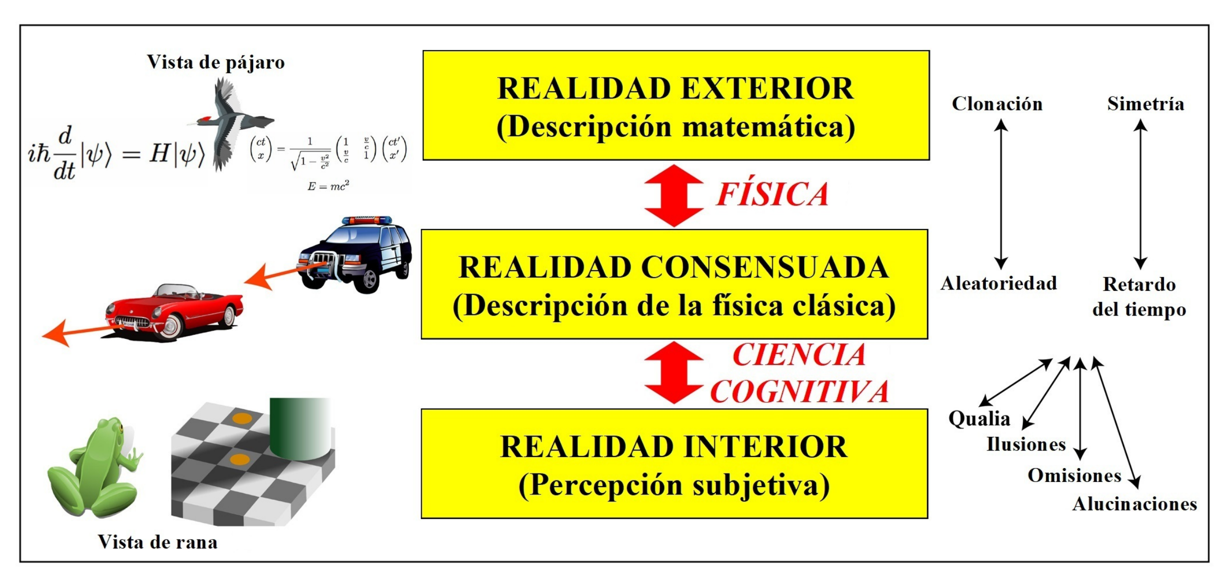


Figura 9.2: Vemos la realidad de tres maneras interrelacionadas: a vista de pájaro, desde la perspectiva de un matemático que estudia las ecuaciones que la describen; desde la perspectiva subjetiva de rana de un observador con consciencia de sí mismo situado dentro de ella; y desde la perspectiva intermedia de consenso con la que solemos describirla entre nosotros (por ejemplo, como objetos clásicos que se mueven en tres dimensiones). De acuerdo con eso, la aspiración de desentrañarla en toda su extensión queda dividida en dos partes que se pueden abordar por separado: desde la física para desvelar cómo se relaciona la realidad exterior con la realidad consensuada (incluyendo complicaciones tales como que la clonación de un observador parezca aleatoria y que el movimiento veloz implique una dilatación del tiempo), y desde la ciencia cognitiva para desvelar cómo se relaciona

la realidad consensuada con la realidad interior (incluidos los qualia y complicaciones tales como las ilusiones, las omisiones y las alucinaciones).

Sin embargo, entre la realidad interior y la realidad exterior hay una tercera realidad intermedia, la *realidad consensuada*, tal como ilustra la figura 9.2. Esta se corresponde con la versión de la realidad en que hemos convenido las formas de vida de la Tierra: las posiciones y movimientos tridimensionales de los objetos macroscópicos, y otras características cotidianas del mundo de las que tenemos una *descripción común* en términos de conceptos que nos son familiares a través de la física clásica. La tabla 9.1 resume estas descripciones y visiones de la realidad y la interrelación que existe entre ellas.

Cada uno de nosotros posee su propia realidad interior percibida desde la subjetividad de su propia posición, orientación y estado mental, y distorsionada por sus propios sesgos cognitivos personales: en la realidad interior de cada cual, los sueños son reales y el mundo se da la vuelta cuando nos ponemos cabeza abajo. En cambio, la realidad consensuada es compartida. Cuando damos instrucciones a un amigo para que llegue a donde estamos, hacemos lo posible por transformar la descripción que tenemos de ese lugar a partir de conceptos subjetivos de nuestra realidad interior (como «aquí» y «frente a mí») en conceptos comunes procedentes de la realidad consensuada (como «en el número 70 de la calle Vassar» y «al norte»). Como los científicos debemos ser precisos y cuantitativos para hablar de la realidad consensuada que compartimos, procuramos ser objetivos por todos los medios: decimos que la luz tiene una «longitud de onda de 600 nanómetros» en lugar de ser «de color naranja», y decimos que algo tiene «moléculas $CH_3COOC_5H_{11}$», en lugar de decir que «sabe a plátano». La realidad consensuada no carece de ciertas ilusiones comunes con respecto a la realidad exterior, tal como detallaremos más adelante: por ejemplo, los gatos, murciélagos y robots también experimentan la misma aleatoriedad cuántica y el mismo retardo relativista del tiempo. Sin embargo, está libre por definición de ilusiones que son exclusivas de las mentes biológicas y, por tanto, se desliga del problema del funcionamiento de la consciencia humana. La realidad interior tal vez sea sin color verde oscuro para mí, blanca y negra para una foca, iridiscente para un pájaro que vea cuatro colores primarios, y más diferente aún para una abeja que ve la luz polarizada, un murciélago que usa sonar, una persona invidente con los sentidos del tacto y el oído más agudizados, o el último modelo de robot aspirador, pero todos coincidimos en lo referente a si la puerta está abierta.

Por eso cambié de parecer: aunque el conocimiento detallado de la naturaleza de la consciencia humana constituye un reto fascinante en sí mismo, *no* es necesario para una teoría fundamental de física, que lo *único* que precisa es deducir la realidad consensuada a partir de ecuaciones. En otras palabras, lo que Douglas Adams llamó «la gran cuestión de la vida, el universo y todo» se divide limpiamente en dos partes que se pueden abordar por separado: el reto de la física consiste en inferir la realidad consensuada a partir de la realidad exterior, y el reto de la ciencia cognitiva estriba en inferir la realidad interior a partir de la realidad consensuada. Estos son los dos grandes desafíos para el tercer milenio. Cada uno de ellos resulta abrumador por sí solo, pero me alivia que no haya que superarlos de manera simultánea.

Prontuario sobre la realidad	
Realidad exterior	El mundo físico que creo que existiría incluso aunque no existieran los humanos
Realidad consensuada	Descripción del mundo físico que comparten todos los observadores con consciencia de sí mismos
Realidad interior	La percepción subjetiva que tenemos de la realidad exterior
Modelo de la realidad	El modelo que tiene el cerebro de la realidad exterior; es la realidad interior que percibe cada cual
Vista de pájaro	Visión que tenemos de la realidad exterior al estudiar las ecuaciones matemáticas abstractas que la describen
Vista de rana	Visión subjetiva que tenemos del mundo físico (la realidad interior de cada cual)

Tabla 9.1: Palabras clave introducidas en este capítulo que seguiremos usando más adelante.

Física: vinculación de la realidad exterior con la realidad consensuada

Acabamos de ver que la realidad consensuada difiere bastante de la realidad interior, y que el desafío de aunar ambas es tan arduo como desentrañar la consciencia. Sin embargo, tal como se ha comentado en otras partes de este libro, la realidad consensuada también se diferencia bastante de la realidad exterior, por lo que es crucial no mezclarlas. De hecho, en mi opinión, la historia de la física moderna evidencia que en algunos de sus logros más notables, lo más duro no fue completar los cálculos, sino desentrañar cómo se relacionan ambas realidades.

Muchas de las ecuaciones determinantes para que Einstein descubriera la relatividad especial en 1905 ya las habían desarrollado Hendrik Lorentz y otros. Pero la genialidad de Einstein sirvió para esclarecer la relación entre las matemáticas y los datos. Reparó en que las longitudes y las duraciones que aparecían en la descripción matemática de la realidad exterior diferían de las medidas en la realidad consensuada, y en que esa discrepancia depende del movimiento: si un avión sobrevuela un grupo de personas, entonces en su realidad consensuada será más corto que antes de despegar, y los relojes a bordo funcionarán más despacio[52].

Cuando Einstein descubrió la relatividad general una década más tarde, Bernhard Riemann y otros ya habían desarrollado partes cruciales del formalismo matemático. Sin embargo, el logro supremo era tan complejo también esta vez que requirió la perspicacia de Einstein: dilucidar que el espacio curvo de la descripción matemática de la realidad exterior se corresponde con la gravitación en la realidad consensuada. Para captar lo difícil que era ver esto, imagine que un genio visitara a Newton en su lecho de muerte y le concediera un último deseo. Tras meditarlo un tanto, Newton responde:

—Dígame, por favor, cómo serán las ecuaciones de la gravitación dentro de trescientos años.

El genio garabatea las ecuaciones íntegras de la relatividad general en una hoja de papel y, como es un genio bueno, le explica, además, cómo traducirlas a notación matemática antigua, la de su época. ¿Sería obvio para Newton que debe interpretarlas como una generalización de su propia teoría?

La dificultad de enlazar la realidad exterior con la realidad consensuada alcanzó una nueva cima con el descubrimiento de la mecánica cuántica, lo que resulta manifiesto en el hecho de que los físicos sigamos debatiendo cómo interpretar la teoría aún hoy, alrededor de un siglo después de su concepción. Como vimos en el capítulo 8, la realidad exterior se describe mediante un espacio de Hilbert en el que una función de onda cambia de forma determinista con el tiempo, mientras que la realidad consensuada es una donde las cosas suceden aparentemente al azar, con distribuciones de probabilidad que se pueden calcular con gran precisión a partir de la función de onda. Pasaron más de treinta años desde el nacimiento de la mecánica cuántica hasta que Everett reveló que esas dos realidades podían reconciliarse, y el mundo tuvo que aguardar otra década hasta el descubrimiento de la decoherencia, algo crítico para reconciliar las macrosuperposiciones de la realidad exterior con su inexistencia en la realidad consensuada.

El gran reto actual de la física teórica consiste en unificar la mecánica cuántica con la gravitación. Sobre la base de esta sucesión de ejemplos históricos, auguro que la teoría matemática correcta de la gravitación cuántica batirá todos los récords previos en cuanto a dificultades para interpretarla. Imagine que nuestro amigo el genio irrumpiera en la sala de conferencias en la víspera del comienzo del próximo congreso sobre gravitación cuántica y que escribiera las ecuaciones de la teoría definitiva en una pizarra. ¿Se daría cuenta alguno de los asistentes del significado de esos signos mientras fueran borrados la mañana siguiente? ¡Lo dudo!

En resumen, la aspiración humana de entender la realidad se divide en dos partes que se pueden abordar por separado: el gran reto de la ciencia cognitiva consiste en enlazar la realidad consensuada con nuestra realidad interior, y el gran reto de la física consiste en unir la realidad consensuada con la realidad exterior. Como hemos visto, si el primer desafío es abrumador, el segundo no lo es menos. La realidad consensuada parece tener objetos sólidos y estáticos impenetrables, pero todo salvo la milbillonésima parte de una roca es espacio vacío entre partículas en incesante vibración esquizofrénica. La realidad consensuada parece un escenario tridimensional donde suceden acontecimientos con el tiempo, pero tal como analizaremos en el capítulo 11, el trabajo de Einstein sugiere que el cambio es una ilusión, y que el tiempo no es más que la cuarta dimensión de un espaciotiempo inmutable que simplemente es, que ni se crea ni se destruye, y que contiene nuestra historia cósmica igual que un DVD contiene una película. El mundo cuántico parece aleatorio, pero tal como vimos en el capítulo anterior, el trabajo de Everett induce a pensar que también la aleatoriedad es una ilusión, que no es más que la manera en que siente la mente humana cuando se clona en universos paralelos divergentes. El mundo de la gravitación cuántica parece… bueno, en este caso a los físicos aún nos queda un laaaargo camino por delante.

En lo que resta de libro nos centraremos en el cometido de la física y lo llevaremos hasta sus límites lógicos: teniendo en cuenta lo que sabemos sobre la realidad consensuada, ¿cómo es la realidad exterior? ¿Cuál es su naturaleza última?

SUMARIO

- He argumentado que, aunque solo haya una realidad verdadera, existen varias perspectivas complementarias sobre ella.

- En la realidad interior de la mente humana, la única información que hay sobre la realidad exterior es la pequeña muestra de ella que transmiten los sentidos.
- Esta información está sometida a numerosas distorsiones, y cabe afirmar que revela tanto sobre los sentidos y el funcionamiento del cerebro humano, como sobre la realidad exterior.
- La descripción matemática de la realidad exterior que ha descubierto la física teórica difiere mucho de la manera en que percibimos esta realidad exterior.
- A medio camino entre la realidad interior y la exterior reside la «realidad consensuada», la descripción del mundo físico que comparten todos los observadores con consciencia de sí mismos.
- Esto divide limpiamente lo que Douglas Adams llamó en broma «la gran cuestión de la vida, el universo y todo» en dos partes que se pueden abordar por separado: el desafío de que las ciencias físicas infieran la realidad consensuada a partir de la realidad exterior, y el reto de que las ciencias cognitivas infieran la realidad interior a partir de la realidad consensuada.
- El resto de este libro se centra en el primero de estos dos desafíos.

10
Realidad física y realidad matemática

La filosofía está escrita en ese libro grandísimo que tenemos constantemente abierto ante los ojos (me refiero al universo), pero no puede entenderse si antes no se aprende a comprender el lenguaje y a conocer los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lengua matemática, y los caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, y sin ellos es imposible entender humanamente palabra alguna; sin ellos es un deambular vano por un oscuro laberinto.

Galileo Galilei,
El ensayador

La inmensa utilidad de las matemáticas en las ciencias naturales es algo que raya en lo misterioso y… no hay ninguna explicación racional para ello.

Eugene Wigner, 1960

¡Guau! Es viernes por la mañana en Princeton y acabo de terminar de leer correos electrónicos relacionados con un proyecto de libro, un horno roto y un debate sobre suicidio cuántico, y de repente me encuentro con esta joya en el buzón de entrada procedente de un profesor titular que conozco:

> Fecha: *4 de diciembre de 1998, 7:17:42, hora local*
> Asunto: *Un correo nada fácil de escribir…*
>
> *Estimado Max:*
> *… sus disparatados artículos no le ayudan nada. En primer lugar, al presentarlos en revistas buenas y tener la mala suerte de que se publiquen, les quita usted la parte «graciosa»… Soy el editor de la importante revista… y su artículo nunca habría colado. Esto no tendría tanta relevancia si no fuera porque los colegas ven esta vertiente de su personalidad como un mal augurio para su trayectoria futura… Sepa que si no desliga por completo estas actividades de la investigación seria, tal vez eliminándolas del todo, y las deja para los bares o lugares así, quizá esté poniendo en riesgo su futuro.*

No era la primera vez que recibía un jarro de agua fría, pero aquel fue uno de esos momentos cumbres en los que entendí que había logrado otro récord personal, una nueva plusmarca para intentar ascender. Cuando le mandé aquel correo a mi padre, uno de los grandes inspiradores de mis aspiraciones científicas, me respondió con una cita de Dante en italiano: *«Segui il tuo corso et lascia dir le genti!»*, o sea, «¡Sigue tu camino y deja que la gente hable!».

Tiene gracia que la mentalidad conformista gregaria esté tan arraigada en muchos físicos, cuando todos defendemos de boquilla un pensamiento que rompa con los esquemas y el cuestionamiento de la autoridad. Ya en la escuela de posgrado fui plenamente consciente de este fenómeno sociológico: por ejemplo, Einstein nunca recibió el Nobel por la revolucionaria teoría de la relatividad[53]. El propio Einstein desestimó el descubrimiento de la expansión del universo de Fridman, y Hugh Everett jamás consiguió un trabajo como físico. En otras palabras, se han desdeñado muchos más descubrimientos importantes de los que puedo esperar hacer yo mismo siendo realista. Así que en la escuela de posgrado me encontré ante un dilema: me había enamorado de la física justamente porque me fascinaban los grandes interrogantes, pero parecía claro que si me limitaba a seguir los dictados del corazón, mi siguiente trabajo sería en McDonald's.

No quería elegir entre mi pasión y mi carrera, así que desarrollé una estrategia secreta que, para mi sorpresa, acabó funcionando la mar de bien y me permitió nadar y guardar la ropa. La bauticé «estrategia Dr. Jekyll y Mr. Hyde», y aproveché una laguna sociológica. Si a Giordano Bruno lo habían quemado en la hoguera en 1600 por sus ideas (con herejías tales como que el espacio es infinito) y Galileo fue condenado a arresto domiciliario de por vida por afirmar que la Tierra órbita alrededor del Sol, los castigos de hoy en día son más livianos. Si te interesan las grandes cuestiones que suenan filosóficas, la mayoría de los físicos te tratará como si estuvieras enganchado a los juegos de ordenador: lo que hagas después del trabajo es asunto tuyo y no se usará en tu contra mientras no te distraiga de tus quehaceres cotidianos y mientras no hables demasiado sobre ello en el trabajo. Así que siempre que las autoridades me preguntaban a qué me dedicaba, me transformaba en el respetable doctor Jekyll y les contaba que me ocupaban temas convencionales de cosmología, como los del capítulo 4, que implican gran cantidad de datos y números y blablablá. Pero a escondidas, cuando nadie me veía, me convertía en el malvado Mr. Hyde y me dedicaba a lo que *de verdad* quería hacer: explorar la naturaleza última de la realidad, como en los capítulos 6, 8 y la

mayor parte de lo que queda de libro. Para acallar recelos, puse una nota breve en mi página de Internet señalando que tenía algunos «intereses marginales», con la broma de que cada vez que llevara escritos diez artículos convencionales, me daría el gusto de escribir uno extravagante. Aquello fue muy práctico porque el único que llevaba la cuenta era yo… Cuando me gradué en Berkeley, había publicado ocho artículos pero la mitad de ellos los había escrito Mr. Hyde, así que los omití en la tesis doctoral. Me encantaba mi director de tesis de Berkeley, Joe Silk, pero para no correr riesgos, me aseguraba de que estuviera lejos de la impresora láser antes de imprimir los artículos de Hyde, y no se los enseñé hasta que me firmó oficialmente la tesis…[54] Y continué con la estrategia: siempre que solicitaba un puesto de trabajo o una beca de investigación, mencionaba únicamente la producción del doctor Jekyll, y mientras, seguía investigando las grandes cuestiones que me encendían (pero bien, no del modo que encendieron a Bruno).

La eficacia de aquella estrategia taimada superó todas mis expectativas, y estoy muy agradecido por trabajar en una universidad con colegas y alumnos brillantes sin tener que dejar de pensar en los temas que más me interesan. Pero ahora me siento en deuda con la comunidad científica ¡y creo que ha llegado el momento de saldarla! Imaginemos todos los temas de investigación dispuestos sobre un espacio metafórico donde una frontera separa lo que pertenece a la física bien asentada de lo que no. Lo llamativo de esa frontera es que, tal como se ve en la figura 10.1, ¡nunca deja de cambiar! En algunas partes se ha replegado porque materias que van desde la alquimia hasta la astrología han quedado fuera de la corriente principal. En otros lugares se ha expandido para que asuntos como la teoría de la relatividad y la teoría microbiana de las enfermedades dejaran de considerarse ideas especulativas minoritarias y pasaran a clasificarse como verdadera ciencia. Creo desde hace mucho que hay otros temas en los que los físicos podemos efectuar aportaciones útiles aunque de entrada suenen más filosóficos, y el tiempo que llevo en un puesto fijo ya no me permite seguir poniendo excusas: creo que tengo la obligación moral frente a científicos más jóvenes de sacar del armario académico a Mr. Hyde para contribuir a ampliar la frontera un poco más. Por eso Anthony Aguirre y yo creamos el Instituto de Preguntas Fundamentales que mencioné en el capítulo 8, **http://fqxi.org**. Y por eso estoy escribiendo este libro.

Entonces, ¿qué artículo mío fue el que desencadenó aquello de «deténgase o arruinará su carrera»? ¿Qué quedaba tan fuera de la frontera de la corriente principal ilustrada en la figura 10.1 como para que aquel profesor sintiera la

necesidad de devolverme al redil? El artículo trataba sobre la idea principal de este libro: que este mundo físico nuestro es un objeto matemático colosal. Y este es el capítulo donde empezaremos a analizarlo.

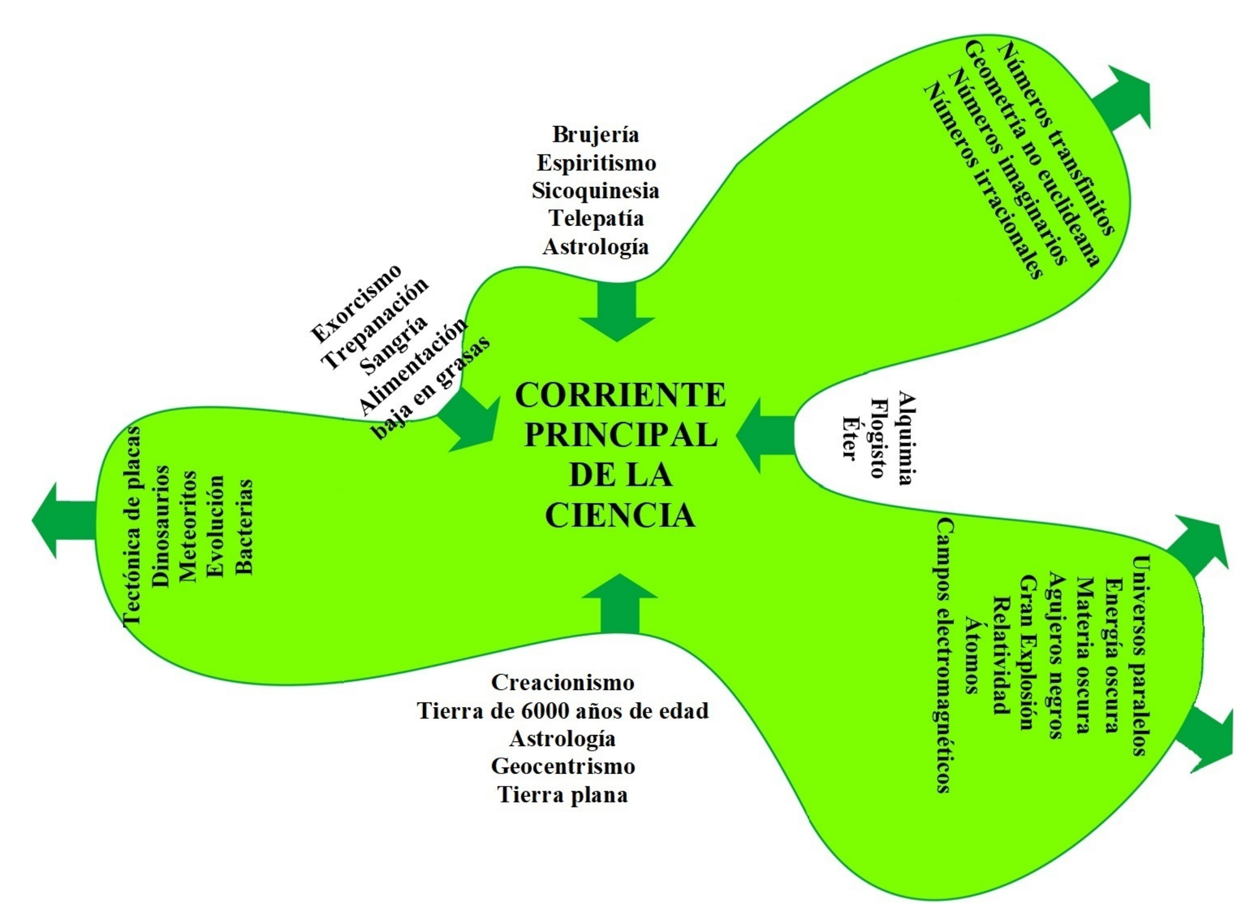


Figura 10.1: La frontera de lo que se considera la corriente principal no deja de cambiar.

¡Matemáticas, matemáticas por doquier!

¿Cuál es la respuesta a la gran cuestión de la vida, el universo y todo? En la parodia de ciencia ficción de Douglas Adams titulada *Guía del autoestopista galáctico*, descubren que la respuesta es 42 y lo más difícil fue dar con la verdadera pregunta. De hecho, aunque es indudable que nuestros inquisitivos ancestros se plantearon estas grandes cuestiones, la búsqueda de una «teoría del todo» evolucionó a medida que aumentaba el conocimiento. Cuando los griegos de la antigüedad reemplazaron las explicaciones basadas en dioses por modelos mecanicistas del Sistema Solar, dejaron de poner el énfasis en preguntarse *por qué* para ponerlo en saber *cómo*.

Desde entonces, el alcance de nuestros interrogantes ha menguado en algunos ámbitos y se ha multiplicado en otros. Tal como ilustra la figura 10.1.

Algunas cuestiones se abandonaron por ingenuas o equivocadas, como la explicación de las órbitas planetarias a partir de principios fundamentales, algo muy popular durante el Renacimiento. Lo mismo podría ocurrirles ahora a estudios que están de moda, como predecir la cantidad de energía oscura que alberga el cosmos, si resultara que esa cantidad en nuestro entorno se debiera a un accidente histórico, tal como se dijo en el capítulo 6. Sin embargo, la capacidad de esclarecer otros interrogantes ha superado con creces las expectativas más amplias de generaciones anteriores: a Newton lo habría sorprendido saber que algún día mediríamos la edad del universo con una precisión del 1 %, y que desentrañaríamos el micromundo lo bastante bien como para desarrollar un *iPhone*.

Me parece muy atinado que Douglas Adams bromeara con el 42, porque las matemáticas han tenido un peso espectacular en todos esos logros[55]. La idea de que nuestro universo es matemático en algún sentido se remonta al menos hasta los pitagóricos de la antigua Grecia, y ha inspirado siglos de debate entre físicos y filósofos. Es bien sabido que Galileo declaró en el siglo XVII que el universo es un «libro grandísimo» escrito en lenguaje matemático. En tiempos más recientes, el físico premiado con el Nobel Eugene Wigner afirmó en la década de 1960 que «la ilógica efectividad de las matemáticas en las ciencias naturales» exigía una explicación.

Figuras, patrones y ecuaciones

Más adelante analizaremos una explicación realmente extrema. Pero antes debemos aclarar con precisión qué es lo que pretendemos explicar. Por favor, deje de leer unos instantes y mire a su alrededor. ¿Dónde están todas esas matemáticas de las que vamos a hablar? ¿No tratan las matemáticas tan solo de números? Probablemente vea algún número aquí y acullá, como los números de página de este libro, pero eso no son más que símbolos inventados e impresos por personas, así que no sirven como indicativo de que nuestro universo sea matemático en algún nivel más profundo.



Figura 10.2: Al lanzar algo al aire, la trayectoria siempre adopta la misma forma, llamada *parábola* invertida, si no choca contra nada y si la resistencia del aire es despreciable.

El sistema educativo imperante favorece que mucha gente identifique las matemáticas con la aritmética. Pero al igual que la física, las matemáticas han avanzado para cuestionarse interrogantes más amplios. Por ejemplo, la cita recién mencionada de Galileo afirma que figuras geométricas como círculos y triángulos son matemáticas. ¿Ve usted alguna forma o figura geométrica al mirar a su alrededor? En este caso tampoco cuentan las cosas fabricadas por las personas, como la forma rectangular de este libro. ¡Pero pruebe a lanzar una piedra al aire y observe la preciosa forma que la naturaleza confiere a su trayectoria! Galileo hizo un descubrimiento extraordinario ilustrado en la figura 10.2: la trayectoria de cualquier cosa lanzada al aire adopta siempre la *misma* forma, llamada *parábola* invertida. Es más, la forma de una parábola se puede describir mediante una ecuación matemática muy simple: $y = x^2$, donde x es la posición horizontal e y es la posición vertical (la altura). Dependiendo de la velocidad y de la dirección iniciales, la figura puede alargarse más o menos en vertical y en horizontal, pero siempre es una parábola.

Al observar cómo se mueven las cosas que orbitan en el espacio, se descubre otra forma recurrente, tal como ilustra la figura 10.3: la *elipse*. La ecuación $x^2 + y^2 = 1$ describe los puntos sobre un círculo, y una elipse no es más que un círculo alargado. La forma de la órbita puede alargarse e inclinarse dependiendo de la velocidad y la dirección iniciales del objeto que se mueve y de la masa del objeto central, pero siempre seguirá siendo una elipse. Es más, ambas formas están relacionadas: los extremos de una elipse

muy alargada tienen casi la misma forma que una parábola y, de hecho, todas esas trayectorias son meros fragmentos de elipses[56].

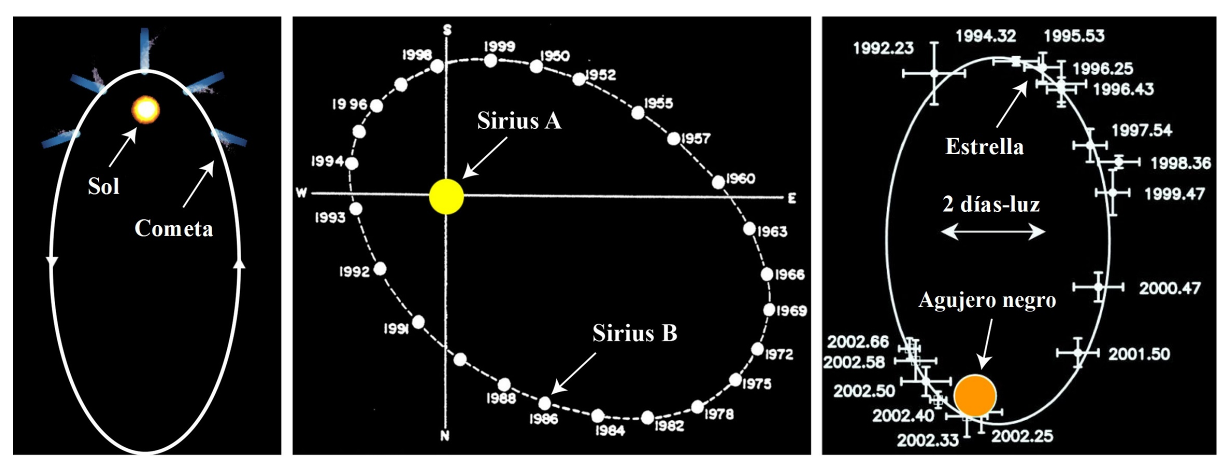


Figura 10.3: Cuando un objeto órbita alrededor de otro debido a la gravitación, su órbita siempre tiene la misma forma, llamada *elipse*, la cual no es más que un círculo estirado en una dirección (siempre que no haya ninguna fuente de rozamiento, y si se ignoran las correcciones einsteinianas a la teoría de la gravitación de Newton, las cuales suelen ser insignificantes a menos que en las proximidades resida un agujero negro). La órbita será una elipse incluso para objetos muy diferentes entre sí, como un cometa que órbita alrededor del Sol (izquierda), el cadáver estelar que constituye la enana blanca en órbita alrededor de Sirius A, la estrella más brillante del firmamento nocturno (centro), y una estrella alrededor del monstruoso agujero negro que reside en el centro de nuestra Galaxia (derecha), que es cuatro millones de veces más masivo que el Sol. (*Esquema de la derecha cedido por Reinhard Genzel y Rainer Schödel*).

Los humanos hemos ido descubriendo muchas otras formas y patrones que se repiten en la naturaleza, no solo en relación con el movimiento y la gravitación, sino también en disciplinas tan dispares como la electricidad, el magnetismo, la luz, el calor, la química, la radiactividad y las partículas subatómicas. Estos patrones se resumen en lo que llamamos nuestras *leyes de la física*. Al igual que la forma de una elipse, todas esas leyes se pueden describir mediante ecuaciones matemáticas, tal como se ilustra en la figura 10.4. ¿Por qué?

Números

Las ecuaciones no son los únicos signos matemáticos inherentes a la naturaleza: también hay números. A diferencia de las creaciones humanas, como los números de página de este libro, nos referimos ahora a números que constituyen propiedades esenciales de nuestra realidad física. Por ejemplo, ¿cuántos lápices se pueden disponer perpendiculares entre sí (formando 90 grados unos con otros)? La respuesta es 3; por ejemplo, al colocarlos a lo largo de los 3 lados que conforman cada esquina de una habitación. ¿De dónde sale ese número 3? Este número es la dimensionalidad de nuestro

espacio, pero ¿por qué hay 3 dimensiones en lugar de 4, o 2, o 42? Y ¿por qué existen, por lo que sabemos de momento, justo 6 tipos de quarks en nuestro universo? Tal como vimos en el capítulo 7, hay muchos más números enteros inherentes a la naturaleza que describen qué clases de partículas elementales existen.

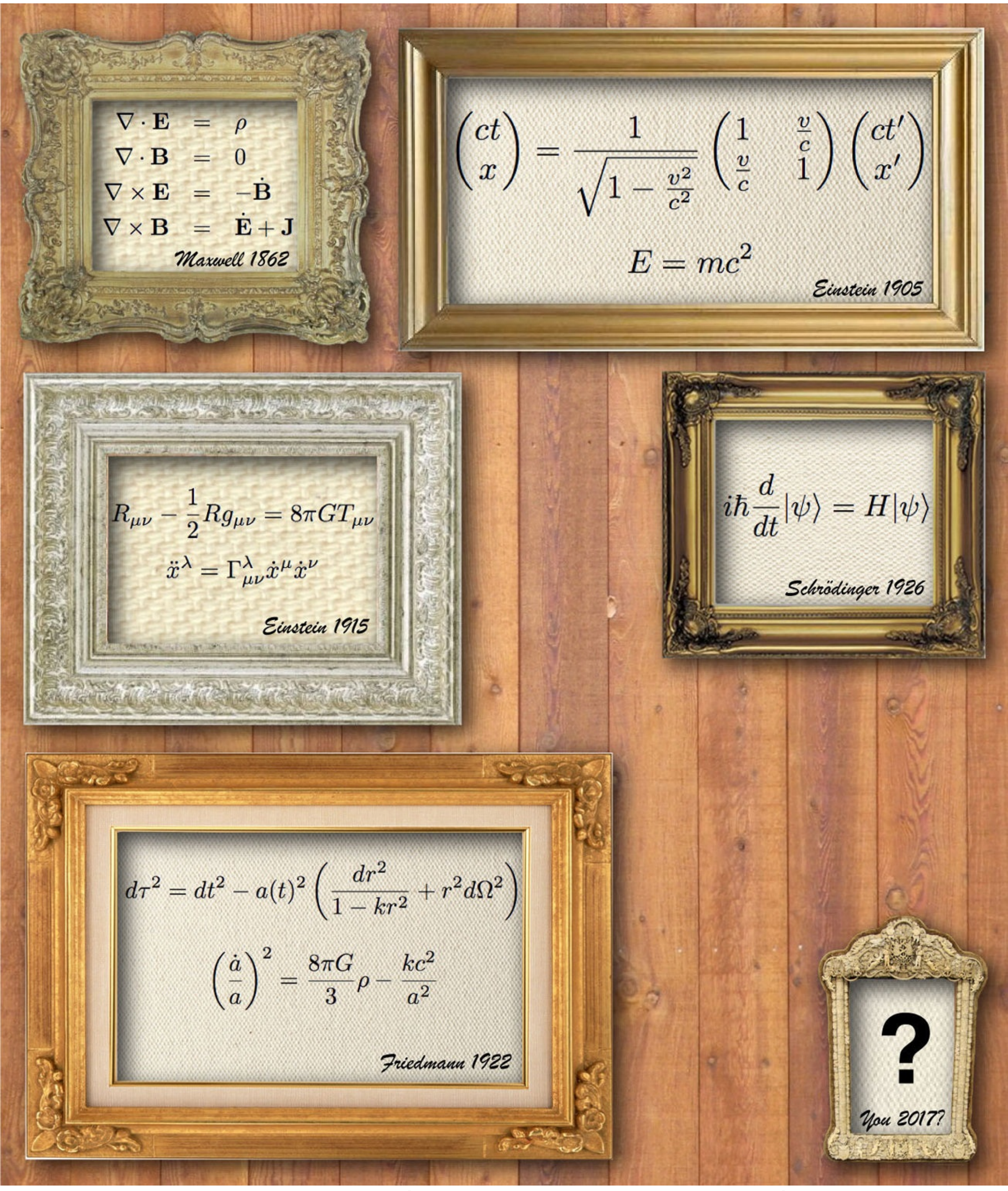


Figura 10.4: Igual que el arte y la poesía dicen mucho mediante muy pocos símbolos, las ecuaciones de la física también lo hacen. De izquierda a derecha y de arriba abajo, estas obras maestras describen el electromagnetismo, el movimiento cercano a la velocidad de la luz, la gravitación, la mecánica cuántica y la expansión del universo. Aún no hemos descubierto ecuaciones para una teoría unificada del todo.

Por si estas no fueran suficientes bondades matemáticas, también hay cantidades codificadas en la naturaleza que no son números enteros, sino que se expresan mediante números decimales. En la naturaleza hay cifrados, según mi último recuento, 32 de esos números fundamentales. ¿Vale en este caso el número que ve usted al pesarse en la báscula del baño? No, ese número no cuenta porque mide algo (su masa) que cambia de un día para otro y que, por tanto, no constituye una propiedad esencial de este universo. ¿Y la masa de un protón, $1{,}672622 \times 10^{-27}$ kg, o la masa de un electrón, $9{,}109382 \times 10^{-31}$ kg, que parecen mantener una constancia perfecta con el paso del tiempo? Tampoco cuentan, porque se miden en cantidad de kilogramos, y esa es una unidad de masa arbitraria inventada por los humanos. Sin embargo, si dividimos uno de esos dos últimos números entre el otro sí se obtiene un resultado esencial: el protón es unas 1836,15267 veces más masivo que el electrón[57] 1836,15267 es un *número puro, adimensional*, igual que lo son π y √2, porque no implica ninguna unidad de medida humana como gramos, metros, segundos o voltios. ¿Por qué casi vale 1836? ¿Por qué no 2013? ¿Por qué no 42? La respuesta más inmediata es que no lo sabemos, pero que creemos que en principio debería ser posible calcular este número y cualquier otra constante elemental de la naturaleza jamás medida únicamente a partir de los 32 números que se relacionan en la tabla 10.1.

Parámetro	**Significado**	**Valor medido**
g	Constante de acoplamiento débil en m_z	$0{,}6520 \pm 0{,}0001$
θ_W	Ángulo de Weinberg	$0{,}48290 \pm 0{,}00005$
g_s	Constante de acoplamiento fuerte en m_z	$1{,}220 \pm 0{,}004$
μ^2	Coeficiente cuadrático de Higgs	$\approx -2 \times 10^{-34}$
λ	Coeficiente cuántico de Higgs	$\approx 0{,}5$
G_e	Acoplamiento electrónico de Yukawa	$0{,}000002931 \pm 10^{-9}$
G_μ	Acoplamiento muónico de Yukawa	$0{,}01022$
G_τ	Acoplamiento tauónico de Yukawa	$0{,}0006060 \pm 0{,}0000002$
G_u	Acoplamiento del quark arriba de Yukawa	$0{,}000014 \pm 0{,}000003$
G_d	Acoplamiento del quark abajo de Yukawa	$0{,}000029 \pm 0{,}000003$
G_c	Acoplamiento del quark encantado de Yukawa	$0{,}0073 \pm 0{,}0001$
G_s	Acoplamiento del quark extraño de Yukawa	$0{,}00054 \pm 0{,}00003$
G_t	Acoplamiento del quark cima de Yukawa	$0{,}995 \pm 0{,}008$
G_b	Acoplamiento del quark fondo de Yukawa	$0{,}0230 \pm 0{,}0002$
sen θ_{12}	Ángulo de la matriz CKM de los quarks	$0{,}2243 \pm 0{,}0016$
sen θ_{23}	Ángulo de la matriz CKM de los quarks	$0{,}0413 \pm 0{,}0015$
sen θ_{13}	Ángulo de la matriz CKM de los quarks	$0{,}0037 \pm 0{,}0005$

δ_{13}	Fase de la matriz CKM de los quarks	$1,05 \pm 0,24$
θ_{qcd}	Fase de la violación CP en el vacío QCD	$< 10^{-9}$
$G_{\nu e}$	Acoplamiento electrón-neutrino de Yukawa	$< 1,3 \times 10^{-11}$
$G_{\nu\mu}$	Acoplamiento muón-neutrino de Yukawa	$< 9,8 \times 10^{-7}$
$G_{\nu\tau}$	Acoplamiento tauón-neutrino de Yukawa	$< 0,00009$
$\text{sen}^2\, 2\theta'_{12}$	Ángulo de la matriz MNS de los neutrinos	$0,857 \pm 0,024$
$\text{sen}^2\, 2\theta'_{23}$	Ángulo de la matriz MNS de los neutrinos	$\pm\, 0,95$
$\text{sen}^2\, 2\theta'_{13}$	Ángulo de la matriz MNS de los neutrinos	$\pm\, 0,098 \pm 0,013$
δ'_{13}	Fase de la matriz MNS de los neutrinos	?
$\rho\Lambda$	Densidad de energía oscura	$(1,16 \pm 0,07) \times 10^{-123}$
ξ_b	Masa bariónica por fotón ρ_b/n_γ	$(4,66 \pm 0,06) \times 10^{-29}$
ξ_c	Masa de materia oscura fría por fotón ρ_c/n_γ	$(24,9 \pm 0,7) \times 10^{-29}$
ξ_ν	Masa neutrínica por fotón $\rho_\nu/n_\gamma = (3/11)\Sigma m_{\nu i}$	$< 0,5 \times 10^{-29}$
Q	Amplitud de las fluctuaciones escalares δ_H en el horizonte	$(2,0 \pm 0,2) \times 10^{-5}$
n	Índice espectral escalar	$0,960 \pm 0,007$

Tabla 10.1: Todas las propiedades fundamentales de la naturaleza medidas hasta ahora se pueden calcular a partir de los 32 números que constan en esta tabla, al menos en teoría. Algunos de estos números se han medido con gran precisión, mientras que otros aún no se han concretado de manera experimental. El significado específico de estos números carece de relevancia para nuestra argumentación, pero si le interesa lo encontrará explicado en este artículo mío: **http://arxiv.org/abs/astro-ph/0511774**. Pero ¿qué estipula estos números?

No se deje intimidar por lo técnicos que suenan los nombres de los números de esa tabla, algo irrelevante para nuestras aspiraciones en este libro. Lo importante es que hay algo muy matemático relacionado con este universo, y que cuanto más lo escudriñamos, más matemáticas encontramos. Con respecto a las constantes de la naturaleza, se han medido cientos de miles de números puros en todas las especialidades de la física que van desde cocientes de masas de partículas elementales a razones entre las longitudes de onda características de la luz emitidas por diferentes moléculas, y cuando se emplean computadoras lo bastante potentes para resolver las ecuaciones que describen las leyes de la naturaleza, da la impresión de que cada uno de esos números se puede calcular a partir de los 32 de la tabla 10.1. Algunos de los cálculos y algunas de las mediciones son realmente complejos y aún no se han efectuado, y tal vez, cuando se consiga, algunos decimales no concuerden entre la teoría y la experimentación. Esas discrepancias se han dado ya reiteradas veces en el pasado y por lo común se han resuelto de una de estas tres maneras:

1. Alguien detectó un error en los experimentos.

2. Alguien detectó un error en los cálculos.
3. Alguien detectó un error en nuestras leyes de la física.

En el tercer caso, lo habitual ha sido encontrar una ley física más fundamental, como cuando las ecuaciones de Newton para la gravitación fueron reemplazadas por las de Einstein para explicar por qué el movimiento de Mercurio alrededor del Sol no traza una elipse perfecta. En todos los casos, se afianzó aún más la sensación de que hay algo matemático en la naturaleza.

Si en el futuro descubriera usted una ley física aún más exacta, el hallazgo tal vez redujera los 32 parámetros de la tabla 10.1 porque quizá permitiera calcular algunas de esas cantidades a partir de otras de la tabla, o podría aumentar la cantidad de esos parámetros mediante la incorporación de otros nuevos, relacionados, por ejemplo, con la masa de nuevos tipos de partículas halladas en el Gran Colisionador de Hadrones instalado a las afueras de Ginebra.

Más pistas

Entonces, ¿qué opinamos sobre todos estos signos matemáticos inherentes a nuestro mundo físico? La mayoría de mis colegas físicos interpretan que la naturaleza se describe por alguna razón a través de las matemáticas, al menos de forma aproximada, y no van más allá. En la obra *¿Es Dios un matemático?*[58], Mario Livio llega a la conclusión de que «*los científicos han seleccionado en qué problemas trabajar teniendo en cuenta cuáles admiten un tratamiento matemático*». Pero estoy convencido de que hay algo más.

En primer lugar, *¿por qué* las matemáticas describen tan bien la naturaleza? Coincido con Wigner en que hace falta una explicación. En segundo lugar, a lo largo de todo este libro hemos hallado pistas de que la naturaleza no solo se *describen* través de las matemáticas, sino que algunos aspectos de ella *son* matemáticos:

1. En los capítulos 2 al 4 vimos que el propio tejido de nuestro mundo físico, el espacio en sí, es un objeto puramente matemático en tanto que las únicas propiedades intrínsecas que posee son propiedades matemáticas: números como la dimensionalidad, la curvatura y la topología.
2. En el capítulo 7 vimos que toda la materia de nuestro mundo físico se compone de partículas elementales, que a su vez son objetos matemáticos puros en tanto que sus únicas propiedades intrínsecas son

de carácter matemático: los números que se relacionan en la tabla 7.1, como la carga, el espín y el número leptónico.
3. En el capítulo 8 vimos que cabe afirmar que hay algo aún más fundamental que nuestro espacio tridimensional y las partículas que alberga: la función de onda y ese lugar de infinitas dimensiones llamado espacio de Hilbert en el que ella habita. Mientras que las partículas se pueden crear y destruir, y pueden estar en varios sitios a la vez, solo hay, hubo y siempre habrá una sola función de onda que se mueve por el espacio de Hilbert tal como establece la ecuación de Schrödinger; y la función de onda y el espacio de Hilbert son objetos matemáticos puros.

¿Y qué significa todo eso? Permítame que le cuente ahora lo que creo que significa, y veamos si usted le encuentra más sentido que aquel profesor que afirmaba que arruinaría mi carrera.

La hipótesis del universo matemático

Todas estas pistas matemáticas me fascinaban en la escuela de posgrado. Una tarde de 1990 en Berkeley, mientras mi amigo Bill Poirier y yo especulábamos sobre la naturaleza última de la realidad, se me ocurrió de pronto una idea sobre lo que podría significar todo aquello: que nuestra realidad no solo se *describe* a través de las matemáticas, sino que *es* matemáticas en un sentido muy específico que expondré a continuación. No solo algunos aspectos de ella, sino toda ella, incluso usted. Esta idea suena bastante descabellada y exagerada, así que después de contársela a Bill, la medité durante muchos años antes de escribir mi primer artículo sobre el tema.

Antes de adentrarnos en los detalles, veamos el esquema lógico que seguiremos para reflexionar sobre este asunto. Partimos de dos hipótesis, una que parece inofensiva y otra que suena radical:

Hipótesis de la realidad exterior (HRE): Existe una realidad física exterior totalmente independiente de nosotros, los humanos.

Hipótesis del universo matemático (HUM): Nuestra realidad física exterior es una estructura matemática.

En segundo lugar, tengo un razonamiento que, con una definición lo bastante general de estructura matemática, permite afirmar que la primera hipótesis implica la segunda.

Mi afirmación de partida, la hipótesis de la realidad exterior, no es demasiado controvertida: supongo que la mayoría de los físicos apoyan esta vieja idea, aunque aún se discute. Los solipsistas metafísicos la rechazan de plano, y los defensores de la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica tal vez la rechacen basándose en que no hay realidad sin observación. Partiendo del supuesto de que existe una realidad exterior, las teorías físicas aspiran a describir cómo funciona. Las teorías más logradas, como la relatividad general y la mecánica cuántica, solo describen partes de esa realidad: la gravitación, por ejemplo, o el comportamiento de partículas subatómicas. Sin embargo, el santo grial de la física teórica es una teoría del todo, una descripción íntegra de la realidad.

Reducción del bagaje permitido

Mi búsqueda personal de esa teoría parte de un planteamiento extremo sobre qué aspecto se le permite tener: *Si admitimos que la realidad existe con independencia de los humanos, para que una descripción de ella sea completa, debe estar bien definida también para entidades no humanas (alienígenas o supercomputadoras, por ejemplo) que no comprendan en absoluto los conceptos humanos. Dicho de otro modo, una descripción tal tiene que expresarse sin ningún bagaje humano como «partícula», observación o cualquier otra palabra humana*.

En cambio, todas las teorías físicas que he aprendido cuentan con dos componentes: ecuaciones matemáticas y «bagaje», es decir, palabras que explican la conexión que mantienen las ecuaciones con lo que observamos y lo que entendemos de manera intuitiva. Cuando descubrimos las consecuencias de una teoría, introducimos nuevos conceptos y términos para nombrarlas, como *protones, átomos, moléculas, células* y *estrellas,* porque nos resulta práctico. Sin embargo, es importante recordar que somos nosotros, los humanos, quienes creamos esos conceptos; en principio todo podría calcularse sin ese bagaje. Una supercomputadora ideal hipotética podría calcular cómo cambia el estado del universo con el paso del tiempo sin necesidad de interpretar lo que sucede en términos humanos, limitándose a calcular cómo se moverán todas las partículas o cómo cambiará la función de onda.

Supongamos, por ejemplo, que la trayectoria de la pelota de baloncesto de la figura 10.2 es la de un precioso lanzamiento en el último instante que le valió a usted una victoria, y que más tarde quiere contarle a un amigo cómo sucedió. Como la pelota se compone de partículas elementales (quarks y electrones), en teoría podría describir el movimiento sin hacer ninguna referencia a pelotas de baloncesto:

- *La partícula 1 sigue una parábola.*
- *La partícula 2 sigue una parábola.*
- …
- *La partícula 138 314 139 265 358 979 323 846 264 sigue una parábola.*

Pero le resultaría un tanto engorroso porque el tiempo que tardaría en contarlo superaría la edad del universo. Además, sería redundante porque todas las partículas están juntas y se mueven como una sola unidad. Por eso los humanos hemos inventado la palabra *pelota* para nombrar a toda la unidad, lo que nos permite ahorrar tiempo describiendo simplemente el movimiento de todo el conjunto de una sola vez.

La pelota es un diseño humano, pero es análoga a objetos compuestos que no son obra humana, como las moléculas, las piedras y las estrellas: inventar palabras para nombrar esos objetos también resulta práctico tanto para ahorrar tiempo como para disponer de conceptos o de las llamadas abstracciones abreviadas para comprender el mundo de una manera más intuitiva. Aunque útiles, todos esos términos constituyen un bagaje opcional: por ejemplo, yo he usado la palabra *estrella* en repetidas ocasiones dentro de este libro, pero en principio todas sus apariciones podrían reemplazarse por una definición que hable de sus elementos constitutivos, por ejemplo, *concentración unida por la gravitación de unos* 10^{57} *átomos, algunos de los cuales experimentan fusión nuclear*. En otras palabras, la naturaleza contiene muchos tipos de entidades que casi imploran tener un nombre. Sin duda, prácticamente todas las poblaciones humanas de la Tierra tienen una palabra para *estrella* en su propio idioma, a menudo inventada de forma autónoma según su propia tradición cultural y lingüística. Sospecho que la mayoría de las civilizaciones alienígenas de sistemas solares distantes también han inventado algún nombre o símbolo para *estrella*, aunque no se comuniquen mediante sonidos.

Otro hecho sorprendente es que a menudo se puede predecir matemáticamente la existencia de esas entidades dignas de nombre, a partir de las ecuaciones que gobiernan sus partes. Así, se puede predecir toda la

jerarquía de estructuras a modo de piezas de lego que comentamos en el capítulo 7, desde partículas elementales a átomos, moléculas, y lo único que hacemos los humanos es incorporar términos llamativos para nombrar los objetos de cada nivel. Por ejemplo, si se resuelve la ecuación de Schrödinger para cinco o menos quarks, resulta que solo hay dos maneras bien estables de organizados: o como una conjunción de dos quarks arriba y un quark abajo o como una conjunción de dos quarks abajo y un quark arriba, y los humanos hemos añadido el bagaje de apelar a esos dos tipos de conjunciones *protones* y *neutrones* por comodidad. De forma análoga, si aplicamos la ecuación de Schrödinger a esas conjunciones, resulta que solo se pueden agrupar de 257 formas estables. Los humanos hemos añadido el bagaje de llamar *núcleos atómicos* a esas agrupaciones y también hemos inventado nombres específicos para cada una de esas formas: *hidrógeno, helio,* etc. La ecuación de Schrödinger también permite calcular todas las maneras de ensamblar átomos para formar objetos mayores, pero esta vez resulta que hay tantos tipos diferentes de objetos estables que no resulta cómodo nombrarlos todos. En lugar de eso, nos hemos limitado a asignar nombre a las clases importantes de objetos (como *moléculas* y *cristales)* y a los objetos más comunes o interesantes de cada clase (por ejemplo, *agua*, *grafito*, *diamante*).

Considero esos objetos compuestos como *emergentes*, en el sentido de que emergen como soluciones de ecuaciones relacionadas únicamente con objetos más fundamentales. Se trata de una emergencia sutil y fácil de pasar por alto porque a lo largo de la historia el proceso científico ha discurrido la mayoría de las veces en dirección contraria: por ejemplo, los humanos conocimos las estrellas antes de saber que están formadas por átomos, conocimos los átomos antes de darnos cuenta de que están formados por electrones, protones y neutrones, y conocimos los neutrones antes de descubrir los quarks. Para cada objeto emergente importante para los humanos, creamos un bagaje en forma de conceptos nuevos.

Este mismo patrón de emergencia y creación humana de bagaje aparece en la figura 10.5, donde se ve una clasificación tosca de las teorías científicas en forma de árbol genealógico en el que, al menos en principio, cada una de ellas se infiere a partir de otras teorías más fundamentales situadas más arriba. Como he dicho, todas estas teorías tienen dos componentes: ecuaciones matemáticas y palabras que explican su relación con lo que observamos. Por ejemplo, en el capítulo 8 vimos que la mecánica cuántica que suele figurar en los libros de texto posee ambos componentes: matemáticas tales como la ecuación de Schrödinger, y postulados fundamentales expresados con claridad

en algún idioma humano, como el postulado del colapso de la función de onda. En cada nivel de la jerarquía de las teorías se introducen conceptos nuevos (como protones, átomos, células, organismos, culturas) por razones prácticas y porque captan la esencia de lo que sucede sin necesidad de recurrir a la teoría fundamental situada más arriba. Somos los humanos quienes introducimos esos conceptos y los vocablos para nombrarlos: en principio todo podría inferirse a partir de la teoría fundamental que ocupe la copa del árbol, aunque un enfoque así, extremadamente reduccionista, no suele ser útil en la práctica. Dicho sin ambages, a medida que descendemos por el árbol, aumenta la cantidad de palabras mientras que disminuye la cantidad de ecuaciones, la cual cae hasta casi cero en disciplinas muy aplicadas, como la medicina y la sociología. En cambio, las teorías próximas a la copa del árbol son muy matemáticas, y los físicos aún luchan por desentrañar los conceptos, si es que hay alguno, mediante los cuales podamos entenderlos.

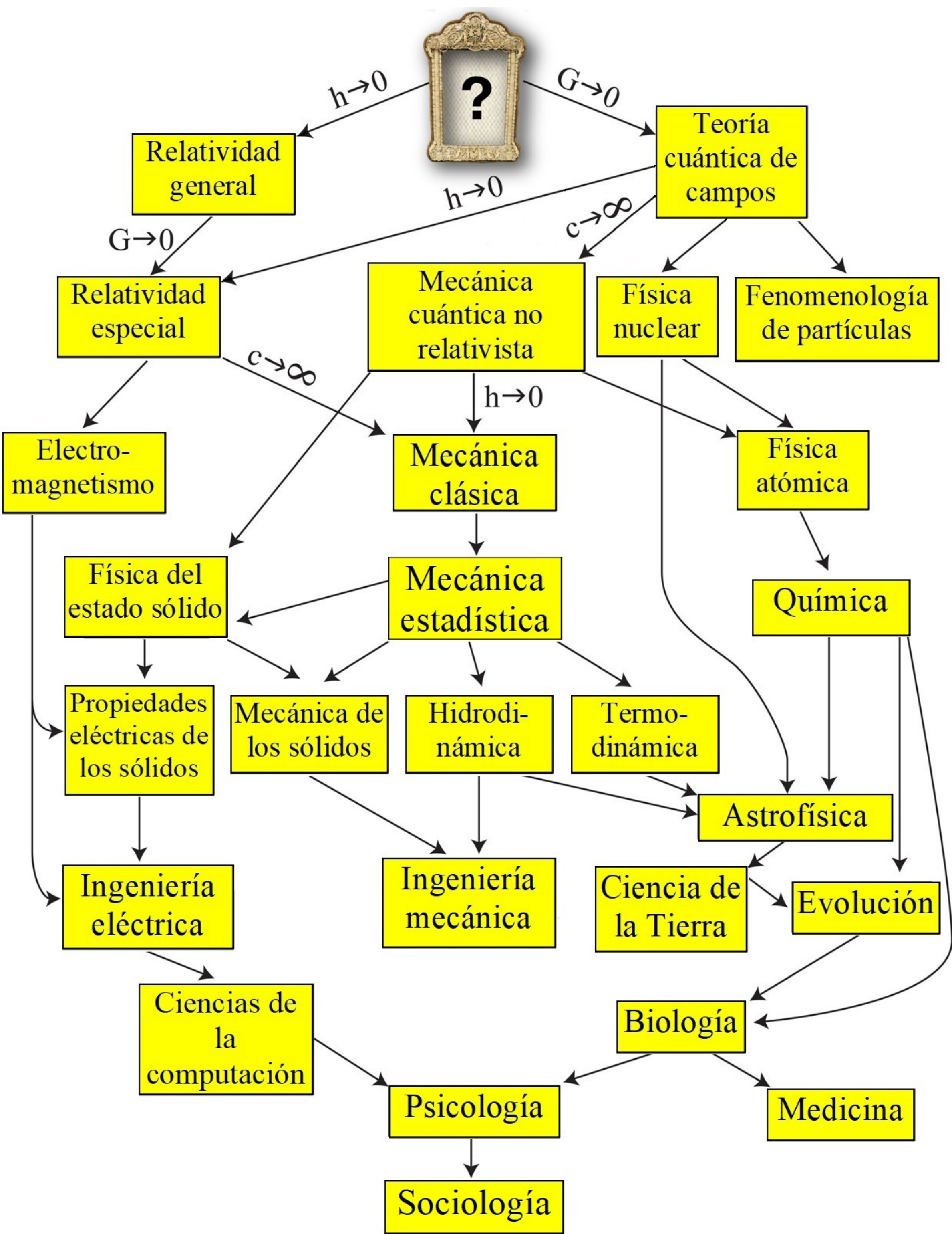


Figura 10.5: Posible ordenación tosca de las teorías, en forma de árbol genealógico donde, al menos en principio, cada una de ellas podría inferirse a partir de otras más fundamentales situadas por encima. Por ejemplo, la relatividad especial se puede obtener a partir de la relatividad general en la aproximación de que la constante gravitatoria de Newton vale cero; la mecánica clásica se puede deducir de la relatividad especial en la aproximación de que la velocidad de la luz *c* es infinita; y la hidrodinámica y conceptos como *densidad* y *presión*, se pueden derivar de la física clásica relacionada con cómo rebotan las partículas. Sin embargo, los casos en los que las flechas se conocen bien son una minoría. Derivar la biología de la química o la psicología de la biología se revela inviable en la práctica. Solo algunos aspectos limitados y aproximados de esas materias son matemáticos, y es probable que

todos los modelos matemáticos descubiertos hasta ahora en física sean también aproximaciones parecidas de aspectos limitados de la realidad.

El santo grial de la física consiste en descubrir lo que jocosamente se denomina «teoría del todo», a partir de la cual se infiere todo lo demás. Ella sería la que sustituiría el gran signo de interrogación que aparece en la parte superior del árbol de las teorías. Tal como dijimos en el capítulo 7, sabemos que falta algo ahí porque no disponemos de una teoría que aúne la gravitación con la mecánica cuántica. Esta teoría del todo se correspondería con una descripción completa de la realidad física exterior, si se admite la hipótesis de la realidad exterior. Al comienzo de este apartado afirmé que esa descripción completa debería estar libre de cualquier bagaje humano. Eso significa que ¡no debe contener ni un solo concepto! En otras palabras, debe ser una teoría puramente matemática, sin explicaciones ni postulados como los que aparecen en los manuales de cuántica (los matemáticos son perfectamente capaces de estudiar estructuras matemáticas abstractas carentes de cualquier significado intrínseco o de toda conexión con conceptos físicos, y a menudo se sienten orgullosos de ello). Un matemático con una inteligencia infinita debería ser capaz de inferir todo el árbol de teorías de la figura 10.5 únicamente a partir de esas ecuaciones, deduciendo las propiedades de la realidad física que describen, las propiedades de sus habitantes, su percepción del mundo y hasta las palabras que inventan. Podría resultar que esa teoría puramente matemática del todo fuera lo bastante simple como para describirla mediante ecuaciones que cupieran en una camiseta.

Todo esto plantea un interrogante: ¿es realmente posible hallar una descripción así de la realidad exterior que no conlleve ningún bagaje? En tal caso, esa descripción de los objetos en esa realidad exterior y de las relaciones entre ellos tendría que ser completamente abstracta y requeriría que cualquier palabra o símbolo fueran meras etiquetas sin significados preconcebidos de ninguna clase. Las únicas propiedades de esas entidades serían las encarnadas por las relaciones que existen entre ellas.

Estructuras matemáticas

Para responder esa pregunta debemos observar las matemáticas más de cerca. Para un lógico moderno, una estructura matemática es justo eso: una serie de entidades abstractas con relaciones entre ellas. Pensemos por ejemplo en los números enteros o en objetos geométricos como el dodecaedro, uno de los preferidos por los pitagóricos. Esto contrasta en gran medida con la primera

impresión que causan las matemáticas en la mayoría de nosotros: las percibimos o bien como instrumento de tortura, o bien como un saco lleno de trucos para manipular números. Al igual que la física, las matemáticas han evolucionado para plantearse cuestiones cada vez más amplias.

Las matemáticas formales se dedican al estudio formal de estructuras que pueden definirse de una manera puramente abstracta, sin ningún bagaje humano. Piense en los símbolos matemáticos como meras etiquetas carentes de significado intrínseco. Lo mismo da escribir «Dos más dos es igual a cuatro», «$2 + 2 = 4$», o *«Two plus two equals four»*. La notación empleada para designar las entidades y las relaciones es irrelevante; las únicas propiedades de los números enteros son las que encarnan las relaciones entre ellos. Es decir, no inventamos estructuras matemáticas, sino que las descubrimos, e inventamos tan solo la notación para describirlas. Es crucial no mezclar el *lenguaje* matemático (el cual inventamos) con las *estructuras* matemáticas (las cuales descubrimos). Si una civilización alienígena se interesara por las formas tridimensionales con caras planas e iguales, descubriría los cinco sólidos de la figura 7.2 que llamamos platónicos. Serán libres de inventar sus propios vocablos exóticos para nombrarlos, pero no tienen libertad para inventar un sexto poliedro: sencillamente no existe. De igual modo, las estructuras matemáticas populares en la física moderna se descubren, no se inventan, desde las variedades riemanninanas de $3 + 1$ dimensiones hasta los espacios de Hilbert.

En resumen, de lo recién expuesto se desprenden dos puntos clave:

1. La hipótesis de la realidad exterior implica que una «teoría del todo» (una descripción completa de nuestra realidad física exterior) no tiene ningún bagaje.
2. Algo que cuenta con una descripción libre de todo bagaje es justamente una estructura matemática.

Todo ello junto implica la hipótesis del universo matemático, es decir, que la realidad física exterior descrita por la teoría del todo es una estructura matemática**[59]**. Lo importante es, pues, que si creemos en una realidad física independiente de los humanos, entonces también debemos creer que nuestra realidad física es una estructura matemática. Ninguna otra cosa se puede describir sin bagaje. En otras palabras, todos residimos en un objeto matemático gigantesco, uno más elaborado que un dodecaedro, y probablemente también más complejo que los objetos de nombres tan intimidatorios como variedades de Calabi-Yau, haces tensoriales y espacios

de Hilbert, que aparecen en las teorías físicas actuales más avanzadas. Todo en nuestro mundo es puramente matemático, incluso usted.

¿Qué es una estructura matemática?

«¡Un momeeeeeeeeeeeeeeeeento!». Eso es lo que solía gritar mi amigo Justin Bendich siempre que una afirmación física daba lugar a interrogantes apremiantes carentes de respuesta, y la hipótesis del universo matemático plantea tres:

- ¿Qué es exactamente una estructura matemática?
- ¿De qué forma exactamente puede ser una estructura matemática nuestro mundo físico?
- ¿Se obtiene de ahí alguna predicción comprobable?

Abordaremos la segunda cuestión en el capítulo 11, y la tercera, en el capítulo 12. Empecemos analizando la primera pregunta, en la cual ahondaremos más en el capítulo 12.

Bagaje y descripciones equivalentes

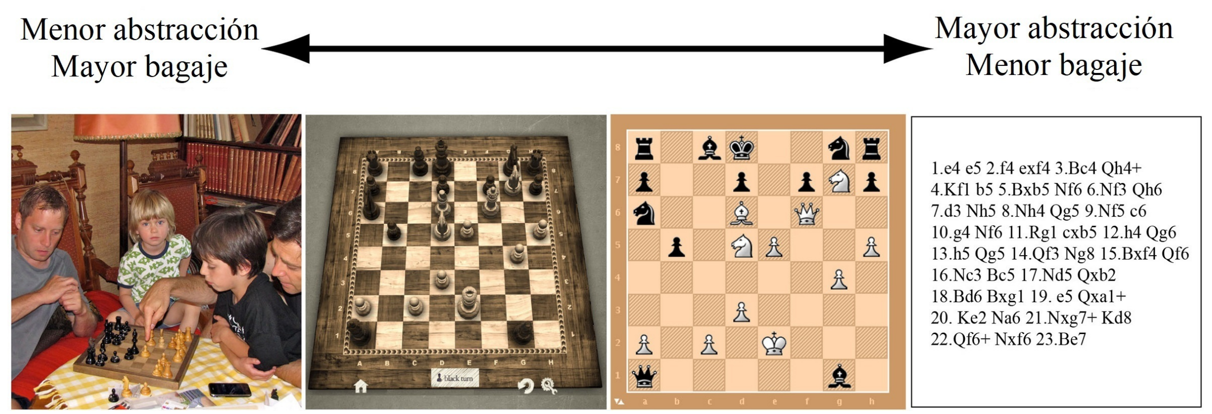


Figura 10.6: Una partida abstracta de ajedrez es independiente de los colores o las formas de las piezas, y de si los movimientos se describen en un tablero físico real, en imágenes estilizadas generadas por ordenador, o en la denominada notación algebraica de ajedrez: sigue siendo la misma partida de ajedrez. De manera análoga, una estructura matemática es independiente de los símbolos empleados para describirla.

Antes hemos detallado cómo añadimos los humanos bagaje a nuestras descripciones. Veamos ahora el proceso contrario: ¿de qué manera la abstracción matemática elimina bagaje y reduce las cosas a su mera esencia?

Consideremos la secuencia de movimientos de ajedrez conocida como «partida inmortal», donde las blancas sacrifican de manera espectacular ambas torres, un alfil y la reina para dar jaque mate con las tres fichas inferiores que quedan, como se muestra en la figura 10.6. Aquí, en la Tierra, esta partida la jugaron por primera vez en 1851 Adolf Anderssen y Lionel Kieseritzky. Pero la misma partida se reproduce todos los años en la localidad italiana de Marostica con gente disfrazada de fichas de ajedrez, y la repiten con regularidad numerosos amantes del ajedrez de todo el mundo. Algunos jugadores (entre ellos mi hermano Per, su hijo Simón y mi hijo Alexander en la figura 10.6) usan piezas de madera, mientras que otros emplean piezas de piedra o de plástico con distintos tamaños y figuras. Hay tableros con escaques de color marrón y beis, otros son negros y blancos, y los hay incluso virtuales, meras gráficas por ordenador tridimensionales o bidimensionales, como en la figura 10.6. Pero parece que ninguno de esos detalles tiene relevancia: cuando los aficionados al ajedrez dicen que la partida inmortal es preciosa, no se refieren al atractivo de los jugadores, del tablero ni de las piezas, sino a una entidad más abstracta, que podríamos denominar el juego abstracto o la secuencia de movimientos.

Veamos en detalle cómo describimos los humanos esas entidades abstractas. En primer lugar, una descripción debe ser específica, de modo que inventamos objetos, vocablos y otros símbolos que se correspondan con las ideas abstractas: por ejemplo, en Estados Unidos llaman *bishop* (‘obispo’) a la pieza de ajedrez que se mueve en diagonal, o sea, al alfil. En segundo lugar, es obvio que ese nombre es arbitrario y que también habrían funcionado muchos otros; de hecho, esa pieza se llama *fou* (‘bufón’) en francés, *strelec* (‘tirador’) en eslovaco, *lopare* (‘corredor’) en sueco y *fil* (‘elefante’) en persa. Sin embargo, podemos reconciliar la singularidad de la partida inmortal con la multiplicidad de sus posibles descripciones mediante la introducción de la poderosa idea de *equivalencia*:

1. Definimos a qué nos referimos al decir que dos descripciones son equivalentes.
2. Establecemos que si dos descripciones son equivalentes, entonces describen una y la misma cosa.

Por ejemplo, acordamos que dos descripciones cualesquiera de una posición de ajedrez son equivalentes si la única diferencia entre ellas radica en el tamaño de las piezas o en los nombres que les dan los jugadores en sus respectivos idiomas.

Cualquier palabra, concepto o símbolo que aparezca en alguna pero no en todas las descripciones equivalentes será claramente opcional y, por tanto, bagaje. Entonces, si quisiéramos descender hasta la mera esencia de la partida inmortal, ¿cuánto bagaje habría que eliminar? Es evidente que mucho, puesto que los ordenadores juegan al ajedrez sin tener ninguna noción del lenguaje humano o de conceptos humanos tales como colores, texturas, tamaños y nombres de fichas de ajedrez. Para entender por completo lo lejos que debemos llegar, hay que fijar una definición más rigurosa de equivalencia:

Equivalencia: Dos descripciones son equivalentes si existe una correspondencia entre ellas que conserve todas las relaciones.

El ajedrez conlleva entidades abstractas (distintas piezas y distintos escaques en el tablero) y relaciones entre ellas. Por ejemplo, una posible relación entre una pieza y un escaque es que la primera ocupe el segundo. Otra relación que puede mantener una ficha con una casilla es que le esté permitido moverse hasta ella. Por ejemplo, los dos paneles centrales de la figura 10.6 son equivalentes de acuerdo con nuestra definición: hay una correspondencia entre las piezas y los tableros tridimensionales y bidimensionales, de manera que siempre que una ficha tridimensional se sitúa sobre un escaque particular, la pieza bidimensional correspondiente ocupa el cuadrado correspondiente. De manera análoga, la descripción de una posición de ajedrez expresada verbalmente en inglés es equivalente a una descripción dada verbalmente en español siempre que se pueda aportar un diccionario que especifique la correspondencia entre las palabras inglesas y castellanas, y si al usarlo para traducir la descripción en castellano se obtiene la descripción en inglés.

Cuando los periódicos y páginas de Internet publican partidas de ajedrez, acostumbran a emplear otra descripción equivalente: la llamada notación algebraica del ajedrez (figura 10.6, derecha). En este caso las piezas no se representan con objetos o palabras, sino mediante letras mayúsculas sueltas; el alfil se corresponde con B, por ejemplo, y los escaques se representan mediante una letra minúscula que especifica la columna y un número que especifica la fila. Como la descripción abstracta del juego de la figura 10.6 (derecha) es equivalente a una descripción en forma de película en la que se juega una partida sobre un tablero físico, todo lo que aparezca en esta última descripción y no esté en la descripción anterior será mero bagaje: desde la existencia física de un tablero hasta las formas, colores y nombres de las piezas. Hasta los detalles de la notación algebraica del ajedrez son bagaje:

cuando los ordenadores juegan al ajedrez, suelen usar otras descripciones abstractas de las posiciones de ajedrez basadas en determinados patrones de ceros y unos que guardan en la memoria. Entonces ¿qué es lo que queda cuando eliminamos todo ese bagaje? ¿Qué es lo que especifican todas esas descripciones equivalentes? La partida inmortal en sí, pura y dura al 100 %, sin ningún aditamento.

Bagaje y estructuras matemáticas

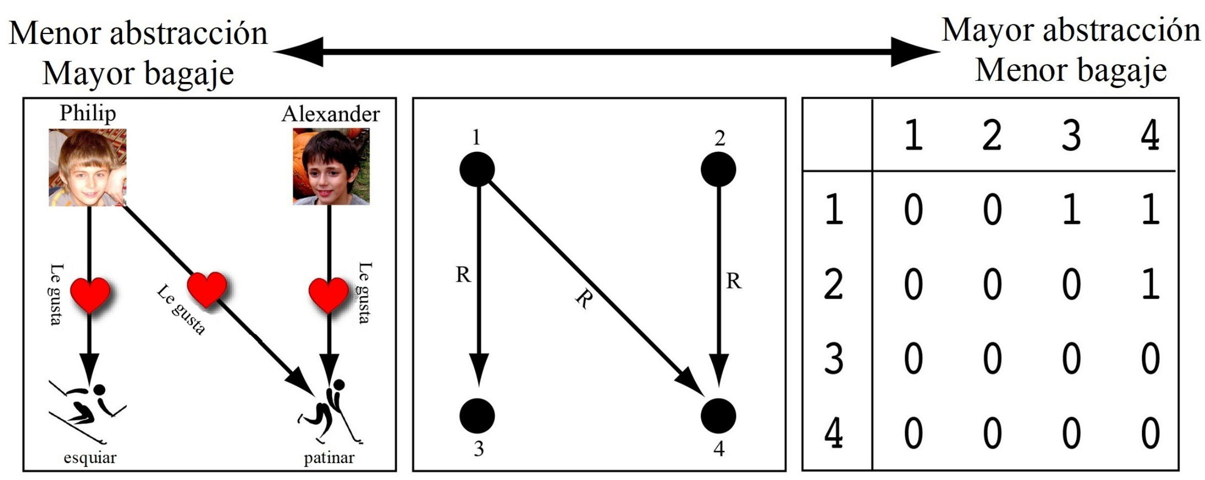
El análisis de este caso concreto relacionado con piezas de ajedrez, recuadros en un tablero y las relaciones entre ellos fue un ejemplo de un concepto mucho más general: una estructura matemática. Se trata de un concepto habitual en lógica matemática moderna del que daré una descripción más técnica en el capítulo 12, pero de momento bastará con esta otra definición no técnica del mismo:

Estructura matemática: Conjunto de entidades abstractas que mantienen relaciones entre ellas.

Veamos un par de ejemplos para entender qué significa eso. La figura 10.7 (izquierda) es una descripción de una estructura matemática con cuatro entidades, algunas de las cuales están relacionadas mediante la correspondencia *le gusta*. En la figura, la entidad *Philip* se representa mediante una imagen con muchas propiedades intrínsecas, como un pelo castaño. Sin embargo, las entidades de una estructura matemática son puramente abstractas, lo que significa que no tienen ninguna propiedad intrínseca en absoluto. Eso significa que cualesquiera que sean los símbolos utilizados para representarlas se trata de meras etiquetas cuyas propiedades son irrelevantes: para evitar el error de atribuir propiedades de los símbolos a las entidades abstractas que simbolizan, consideremos la descripción más espartana del panel central. Esta descripción es equivalente a la primera, porque al aplicar la correspondencia que figura en el diccionario *Philip* = 1, *Alexander* = 2, *esquiar* = 3, *patinar* = *4* y *le gusta* = R, todas las relaciones se mantienen. Por ejemplo «A Alexander le gusta patinar» se traduce como «2 R 4», que en efecto es una relación que se mantiene en el panel central.

Igual que las partidas de ajedrez se pueden describir usando tan solo símbolos, sin ninguna gráfica, lo mismo ocurre con las estructuras matemáticas. Por ejemplo, el panel de la derecha de la figura 10.7 ofrece una

tercera descripción equivalente de nuestra estructura matemática, esta vez en forma de tabla de números de cuatro por cuatro. En esta tabla, la entrada 1 significa que la relación (*le gusta*) se mantiene entre el elemento correspondiente situado en esa fila y el elemento correspondiente situado en esa columna, así que el 1 que hay en la tercera columna de la primera fila significa que «A Philip le gusta esquiar». Es evidente que hay muchas más formas equivalentes de describir esta estructura matemática, pero todas estas descripciones equivalentes solo describen una única estructura matemática. En resumen, cualquier descripción particular de una estructura matemática contiene bagaje, pero la estructura en sí, no. Es importante no confundir la descripción con lo descrito: ni siquiera la descripción más abstracta en apariencia de una estructura matemática es la estructura en sí. Más bien, la estructura se corresponde con la clase de todas las descripciones equivalentes de ella. La tabla 10.2 resume las relaciones entre estos y otros conceptos clave vinculados a la idea del universo matemático.



	1	2	3	4
1	0	0	1	1
2	0	0	0	1
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0

Figura 10.7: Tres descripciones equivalentes de la misma estructura matemática, lo que en matemáticas se llamaría una «gráfica ordenada con cuatro elementos». Cada descripción contiene algún bagaje arbitrario, pero la estructura que todas describen está libre de bagaje al 100 %: ninguna de las cuatro entidades tiene más propiedades que las relaciones que mantienen entre ellas, y la relación no tiene ninguna propiedad en absoluto salvo la información referente a qué elementos relaciona.

Simetría y otras propiedades matemáticas

A algunos matemáticos les gusta debatir sobre qué son realmente las matemáticas, y en realidad no existe ningún consenso al respecto. No obstante, una definición bastante extendida de las matemáticas reza «es el estudio formal de estructuras matemáticas». En esta misma línea, los matemáticos han identificado gran cantidad de estructuras matemáticas interesantes, que van desde las más conocidas, como el cubo, el icosaedro

(figura 7.2) y los números enteros, hasta otras de nombres exóticos como los espacios de Banach, orbivariedades y variedades seudorriemannianas.

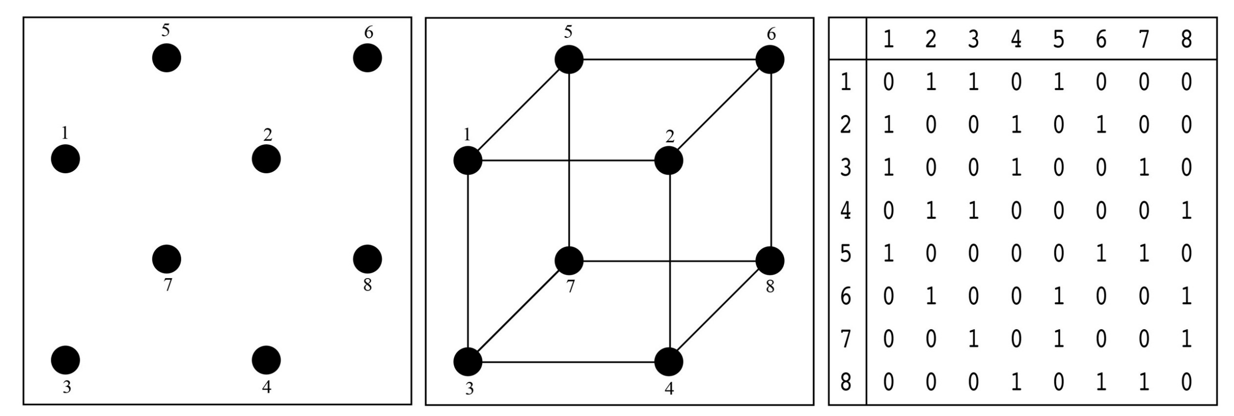
Una de las cosas más importantes que hacen los matemáticos al estudiar estructuras matemáticas es demostrar teoremas sobre sus propiedades. Pero ¿qué propiedades puede tener una estructura matemática si a sus entidades y relaciones no se les permite tener ni una sola propiedad intrínseca?

Consideremos la estructura matemática descrita en el panel de la izquierda de la figura 10.8. No existe ninguna relación en absoluto entre sus entidades, de modo que no hay nada que diferencie una entidad de otra. Eso significa que esta estructura matemática no posee ninguna propiedad salvo su *cardinalidad,* la cantidad de entidades que contiene. Esta estructura matemática se suele denominar «el conjunto de 8 elementos», y su única propiedad consiste en tener ocho elementos: ¡una estructura bastante insulsa!

El panel central de la figura 10.8 describe una estructura matemática de ocho elementos distinta y más interesante, que incluye una relación. Una descripción de esta estructura sería que los elementos conforman los vértices de un cubo, y la relación especifica qué vértices están conectados mediante una arista. Pero recordemos que no hay que confundir la descripción con lo descrito: la estructura matemática en sí no tiene ninguna propiedad intrínseca, como tamaño, color, textura o composición, solo cuenta con esas ocho entidades relacionadas que opcionalmente se pueden interpretar como vértices de un cubo. De hecho, el panel de la derecha de la figura 10.8 brinda una definición equivalente de esta estructura matemática sin hacer ninguna referencia a nociones geométricas como cubos, vértices o aristas.

Entonces, si las entidades de esta estructura carecen de propiedades intrínsecas ¿posee alguna propiedad interesante la estructura en sí (aparte de tener ocho elementos)? Lo cierto es que sí: ¡tiene *simetrías!* En física, decimos que algo tiene una simetría si no cambia al someterlo a alguna transformación. Por ejemplo, decimos que el rostro humano tiene *simetría especularse* se ve igual al invertir el lado derecho y el izquierdo. Del mismo modo, la estructura matemática de la figura 10.8 (centro) posee simetría especular: si se intercambian los elementos 1 y 2, 3 y 4, 5 y 6, y 7 y 8, la representación gráfica de las relaciones sigue siendo la misma. También tiene cierta simetría rotacional que se corresponde con rotar el cubo del dibujo o bien 90 grados sobre una de sus caras, o bien 120 grados sobre uno de sus vértices, o bien 180 grados sobre el centro de una arista. Aunque intuitivamente tendemos a pensar que la simetría guarda relación con la geometría, en realidad encontramos esas mismas simetrías con tan solo

manipular la tabla del panel de la derecha de la figura 10.8: si reenumeramos los ocho elementos de determinadas maneras y después reordenamos la tabla aumentando la cantidad de filas y de columnas, acabamos obteniendo una tabla idéntica a la de partida.



	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	0	1	0	0	0
2	1	0	0	1	0	1	0	0
3	1	0	0	1	0	0	1	0
4	0	1	1	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	1	1	0
6	0	1	0	0	1	0	0	1
7	0	0	1	0	1	0	0	1
8	0	0	0	1	0	1	1	0

Figura 10.8: El panel central describe una estructura matemática con ocho elementos (simbolizados mediante puntos) y relaciones entre ellos (simbolizadas mediante líneas). Esos elementos se pueden interpretar como vértices de un cubo, y la relación se puede interpretar como la especificación de qué vértices están conectados entre sí mediante una arista, pero esta interpretación es un bagaje completamente opcional: el panel de la derecha da una descripción equivalente de esta misma estructura matemática sin ninguna gráfica ni geometría (por ejemplo, el 1 que aparece en la quinta columna de la sexta fila significa que existe una relación entre los elementos 5 y 6). Esta estructura matemática posee muchas propiedades interesantes que incluyen una simetría especular y ciertas simetrías rotacionales. En cambio, la estructura matemática descrita en el panel de la izquierda no tiene relaciones ni ninguna propiedad interesante en absoluto, salvo su cardinalidad, 8, el número de elementos que contiene.

Un problema espinoso muy conocido en filosofía es el llamado *problema de la regresión al infinito*. Por ejemplo, si decimos que las propiedades de un diamante se pueden explicar mediante las características y la disposición de sus átomos de carbono; que las propiedades de un átomo de carbono se pueden explicar a partir de las características y la disposición de sus protones, neutrones y electrones; que las propiedades de un protón se pueden explicar por las características y la disposición de sus quarks, y así sucesivamente, entonces parece que estamos abocados a seguir explicando eternamente las propiedades de las partes constitutivas. La hipótesis del universo matemático ofrece una solución definitiva a este problema: en el nivel más inferior, la realidad es una estructura matemática, de modo que sus partes ¡carecen por completo de propiedades intrínsecas! En otras palabras, la hipótesis del universo matemático implica que vivimos en una *realidad relacional*, en tanto que las propiedades del mundo que nos rodea no provienen de las propiedades de sus elementos constitutivos últimos, sino de las relaciones que existen entre esos elementos constitutivos[60]. La realidad física exterior es, pues, más que la suma de sus partes, en tanto que puede tener muchas propiedades

interesantes aunque sus partes no posean ninguna propiedad intrínseca en absoluto.

Las estructuras matemáticas específicas que se ilustran en las figuras 10.7 y 10.8 pertenecen a la familia de las estructuras matemáticas que se conocen como *grafos*: elementos abstractos, algunos de los cuales están conectados por pares. Se pueden usar otros grafos para describir las estructuras matemáticas correspondientes al dodecaedro y el resto de sólidos platónicos de la figura 7.2. Otro ejemplo de grafo es la red de amigos de Facebook: ahí los elementos se corresponden con todos los usuarios de Facebook, y dos usuarios están conectados si mantienen una relación de amistad. Aunque los matemáticos han estudiado los grafos a fondo, no son más que una de las muchas familias distintas de estructuras matemáticas que hay. Abordaremos las estructuras matemáticas con más detalle en el capítulo 12, pero antes echaremos una ojeada rápida a unos cuantos ejemplos más, para hacernos una idea de lo variadas que pueden ser las estructuras matemáticas.

Existen muchas estructuras matemáticas que se corresponden con distintos tipos de números. Por ejemplo, los llamados *números naturales*, 1, 2, 3… en su conjunto forman una estructura matemática. Ahí los elementos son los números, y hay muchas clases diferentes de relaciones. Algunas relaciones (como *igual a*, *mayor que* y *divisible entre*) se dan entre dos números («15 *es divisible entre* 5», por ejemplo), otras se establecen entre tres números (digamos «17 *es la suma de* 12 y 5») y otras implican otras cantidades de números. La comunidad matemática ha ido descubriendo clases cada vez mayores de números que conforman sus propias estructuras matemáticas, como los *enteros* (que incluyen los números negativos), los *números racionales* (que incluyen las fracciones), los *números reales* (que incluyen la raíz cuadrada de 2), los *números complejos* (que incluyen la raíz cuadrada de −1), y los *números trasfinitos* (que incluyen números infinitos). Cuando cierro los ojos y pienso en el número 5, lo veo amarillo. Pero en todas esas estructuras matemáticas, los números en sí no poseen ninguna propiedad intrínseca de ese tipo, y las únicas características que tienen proceden de sus relaciones con otros números (el 5 tiene la propiedad de ser la suma de 4 y 1, por ejemplo, pero no es amarillo, y no está hecho de ninguna cosa).

Prontuario del universo matemático	
Bagaje	Conceptos y palabras inventados por nosotros, los humanos, por comodidad, que no son necesarios para describir la realidad física exterior
Estructura matemática	Conjunto de entidades abstractas que mantienen relaciones entre ellas; se puede describir sin recurrir a un bagaje
Equivalencia	Dos descripciones de estructuras matemáticas son equivalentes cuando se da una

	correspondencia entre ellas que conserva todas las relaciones; si dos estructuras matemáticas tienen descripciones equivalentes, entonces son una misma.
Simetría	La propiedad de permanecer inalterado al someterse a una transformación; por ejemplo, una esfera perfecta permanece inalterada al rotarla
Hipótesis de la realidad exterior	La hipótesis de que existe una realidad física exterior completamente independiente de nosotros, los humanos
Hipótesis del universo matemático	La hipótesis de que nuestra realidad física exterior es una estructura matemática; yo defiendo que esta hipótesis se infiere de la hipótesis de la realidad exterior
Hipótesis del universo computable	Nuestra realidad física exterior es una estructura matemática definida mediante funciones computables (capítulo 12)
Hipótesis del universo finito	Nuestra realidad física exterior es una estructura matemática finita (capítulo 12)

Tabla 10.2: Guía de conceptos clave relacionados con la idea del universo matemático.

Otra gran clase de estructuras matemáticas se corresponde con distintos tipos de espacios. Por ejemplo, el espacio euclídeo tridimensional que aprendimos en el colegio es una estructura matemática. Ahí los elementos son puntos sobre el espacio tridimensional y números reales que se interpretan como distancias y ángulos. Hay muchas clases distintas de relaciones. Por ejemplo, tres puntos pueden mantener la relación de caer sobre una línea. Hay otra estructura matemática distinta que se corresponde con el espacio euclídeo de cuatro dimensiones y con cualquier otra cantidad de dimensiones. La comunidad matemática también ha descubierto muchos otros tipos de espacios más generales que conforman sus propias estructuras matemáticas, como los denominados espacio de Minkowski, espacios de Riemann, espacios de Hilbert, espacios de Banach y espacios de Hausdorff. Mucha gente creía que el espacio físico tridimensional en el que nos encontramos era un espacio euclídeo. Sin embargo, ya vimos en el capítulo 2 que Einstein acabó con esa idea. Primero su teoría especial de la relatividad dijo que vivimos en un espacio de Minkowski (que incluye el tiempo como una cuarta dimensión), después la teoría general de la relatividad dijo que más bien vivimos en un espacio de Riemann, lo que significaba que podría estar curvado. Después, como vimos en el capítulo 7, llegó la mecánica cuántica y dijo que en realidad vivimos en un espacio de Hilbert. De nuevo, los puntos en esos espacios no se componen de nada, y no tienen color, textura ni ninguna otra propiedad intrínseca de ninguna clase.

Aunque el conjunto de las estructuras matemáticas conocidas sea grande y exótico, y aún queden muchas más por descubrir, cada estructura matemática

individual se puede analizar para precisar sus propiedades de simetría, y muchas tienen alguna simetría interesante. Curiosamente, uno de los descubrimientos más importantes de la física ha sido que nuestra realidad física también tiene simetrías inherentes: por ejemplo, las leyes de la física tienen simetría rotacional, lo que significa que en este universo no hay ninguna dirección especial que podamos llamar «arriba». También parecen tener simetría traslacional (desplazamiento lateral), lo que significa que no hay ningún lugar especial que podamos denominar el centro del espacio. Muchos de los espacios que acabamos de mencionar poseen simetrías preciosas, algunas de las cuales coinciden con las simetrías observadas en el mundo físico. Por ejemplo, el espacio euclídeo tiene simetría tanto rotacional (lo que significa que no notaríamos ninguna diferencia si se rotara el espacio) como traslacional (lo que significa que no notaríamos la diferencia si se desplazara el espacio hacia los lados). El espacio tetradimensional de Minkowski tiene aún más simetrías: ni siquiera notaríamos la diferencia si aplicáramos un tipo de rotación generalizada entre las dimensiones del tiempo y del espacio, y Einstein reveló que esto explica por qué el tiempo parece frenarse cuando se viaja a velocidades cercanas a la de la luz, tal como comentamos en el capítulo anterior. En el último siglo se han descubierto muchas más simetrías sutiles de la naturaleza, y estas simetrías constituyen los fundamentos de las teorías relativistas de Einstein, la mecánica cuántica y el modelo estándar de la física de partículas.

Repárese en que estas propiedades de simetría tan importantes para la física provienen justamente de la ausencia de propiedades intrínsecas en los elementos constitutivos de la realidad, es decir, de la mismísima esencia de lo que significa para ella ser una estructura matemática. Si tomamos una esfera incolora y la pintamos en parte de amarillo, entonces destruimos su simetría rotacional. De manera análoga, si los puntos de un espacio tridimensional tuvieran alguna propiedad que confiriera a algunos puntos diferencias intrínsecas frente a otros, entonces el espacio perdería su simetría rotacional y traslacional. «Menos es más», en tanto que cuantas menos propiedades tienen los puntos, mayor simetría posee el espacio.

Si la hipótesis del universo matemático es correcta, entonces este universo es una estructura matemática, y a partir de su descripción cualquier matemático infinitamente inteligente podría deducir todas estas teorías físicas. ¿Cómo lo haría exactamente? No lo sabemos, pero estoy bastante seguro de cuál sería el primer paso: calcular las simetrías de la estructura matemática.

Al comienzo de este capítulo conocimos los sombríos augurios de que mis publicaciones sobre la relación entre las matemáticas y la física eran demasiado descabelladas y arruinarían mi carrera. Acabo de contarle la primera parte de esas ideas argumentando que nuestra realidad física exterior es una estructura matemática, lo que, en efecto, suena bastante disparatado. Pero esto no fue más que el calentamiento; la cosa se tornará mucho más desatinada más adelante, cuando analicemos ¡las implicaciones y las predicciones comprobables de la hipótesis del universo matemático! Entre otras cosas, nos veremos abocados inexorablemente hacia un nuevo multiverso tan grande que hasta el multiverso del nivel III de la mecánica cuántica palidecerá a su lado. Pero antes debemos responder una cuestión crucial. Este mundo físico cambia con el tiempo, mientras que las estructuras matemáticas no lo hacen, existen sin más. Entonces, ¿cómo puede ser nuestro mundo una estructura matemática? Abordaremos este interrogante en el próximo capítulo.

SUMARIO

- Desde la antigüedad, la gente se ha preguntado por qué el mundo físico se describe con tanta precisión a través de las matemáticas.
- Desde entonces, los físicos no han parado de descubrir cada vez más formas, patrones y regularidades en la naturaleza que se describen mediante ecuaciones matemáticas.
- El tejido de nuestra realidad física contiene docenas de números puros a partir de los cuales se pueden calcular, en principio, todas las constantes que se han medido.
- Algunas entidades físicas determinantes, como el espacio vacío, las partículas elementales y la función de onda, parecen ser puramente matemáticas, en tanto que sus únicas propiedades intrínsecas son propiedades matemáticas.
- La hipótesis de la realidad exterior (HRE) (que existe una realidad física exterior completamente independiente de nosotros, los humanos) es aceptada por la mayoría de los físicos, pero no por todos.
- Con una definición lo bastante amplia de matemáticas, la HRE implica la hipótesis del universo matemático (HUM): que este mundo físico es una estructura matemática.
- Esto significa que nuestro mundo físico no solo se describe mediante las matemáticas, sino que es matemático de por sí (una estructura

matemática), lo que nos convierte en partes autoconscientes de un objeto matemático gigantesco.

- Una estructura matemática es un conjunto abstracto de entidades que mantienen relaciones entre ellas. Las entidades no poseen ningún «bagaje»: no tienen ninguna propiedad en absoluto al margen de esas relaciones.
- Una estructura matemática puede tener muchas propiedades interesantes (por ejemplo, simetrías), aunque ninguna de sus entidades ni de sus relaciones tenga ninguna propiedad intrínseca en absoluto.
- La HUM resuelve el deshonroso problema de la regresión al infinito, según el cual las propiedades de la naturaleza solo se pueden explicar a partir de las propiedades de sus partes, lo que requiere una explicación adicional constante, *ad infinitum*: las propiedades de la naturaleza no provienen de las propiedades de sus elementos constitutivos últimos (que no tienen ninguna propiedad en absoluto), sino de las relaciones entre esos elementos constitutivos.

11
¿Es el tiempo una ilusión?

La diferencia entre pasado, presente y futuro es una ilusión, si bien una muy pertinaz.

Albert Einstein

El tiempo es una ilusión, y la hora de comer lo es por partida doble.

Douglas Adams,
Guía del autoestopista galáctico

Si usted es como yo, sentirá desconcierto ante las preguntas sin respuesta. En el capítulo anterior surgieron muchas, así que tiene sentido que se cuestione lo que he dicho en él. Por ejemplo, yo afirmaba que nuestra realidad física exterior es una estructura matemática, pero ¿qué significa eso en verdad? Esta realidad física cambia sin cesar (las hojas se mueven con el viento y los planetas orbitan alrededor del Sol), mientras que las estructuras matemáticas son estáticas: un dodecaedro abstracto siempre ha tenido y siempre tendrá justo 12 caras pentagonales. ¿Cómo puede ser inmutable algo cambiante? Otra pregunta acuciante es ¿cómo encaja usted personalmente en esta supuesta estructura matemática? ¿Cómo es posible que la consciencia que tenemos de nosotros mismos, nuestros pensamientos y nuestros sentimientos, formen parte de una estructura matemática?

¿Cómo puede ser matemática la realidad física?

Realidad atemporal

Einstein puede ayudarnos a responder estos interrogantes. Él nos enseñó que hay dos formas equivalentes de entender la realidad física: o bien como un lugar tridimensional llamado *espacio* donde las cosas cambian con el tiempo, o bien como un lugar tetradimensional llamado *espacio-tiempo* que existe sin

más, inmutable, nunca creado y nunca destruido[61]. Estas dos concepciones se corresponden con las vistas de rana y de pájaro sobre la realidad que comentamos en el capítulo 9: la perspectiva de pájaro es la visión exterior de todo el conjunto que tiene un físico que estudia su estructura matemática, como un ave que otea un paisaje desde la altura; la perspectiva de rana es la visión interior que tiene un observador inmerso en esa estructura, como una rana que vive dentro del paisaje oteado por el ave.

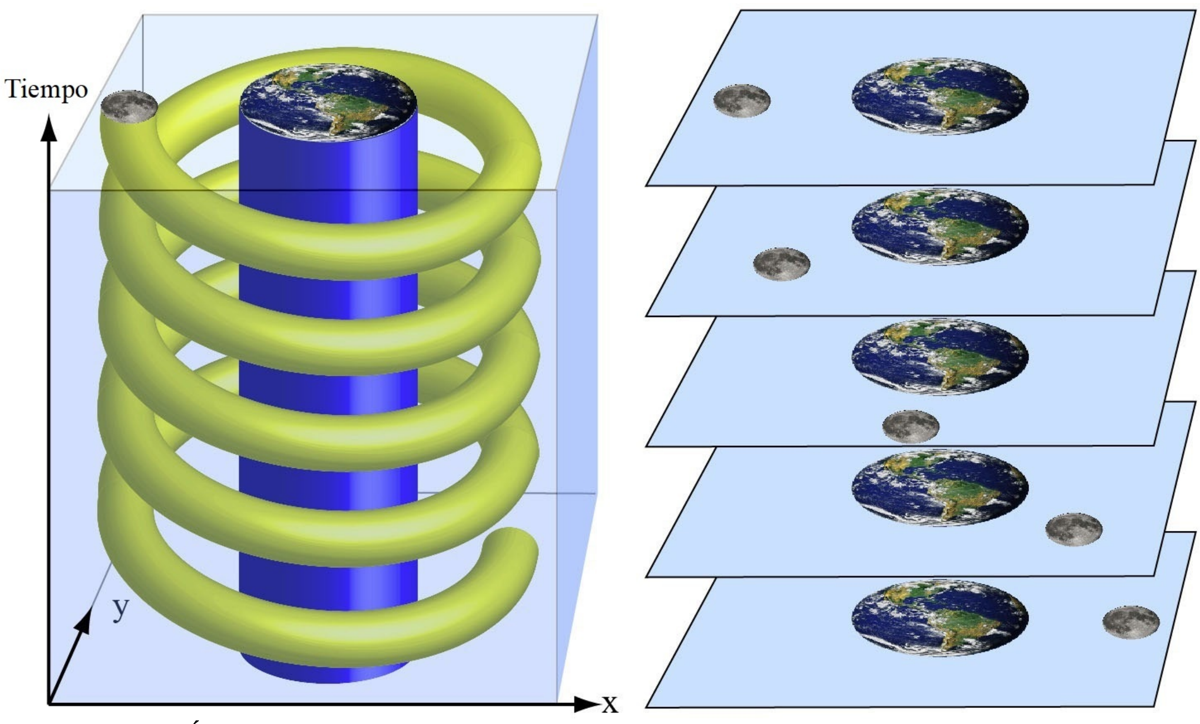


Figura 11.1: Órbita de la Luna alrededor de la Tierra. Sería equivalente interpretar esta situación como una posición dentro del espacio que cambia con el tiempo (derecha) o como una espiral invariable dentro del espaciotiempo (izquierda), que se correspondería con una estructura matemática. Las instantáneas del espacio (derecha) no son más que cortes horizontales del espaciotiempo (izquierda).

Desde un punto de vista matemático, el espaciotiempo es un espacio de cuatro dimensiones; las tres primeras son las dimensiones del espacio a las que estamos habituados, y la cuarta dimensión es el tiempo. La figura 11.1 ilustra esta idea. En ella he representado la dimensión del tiempo en un sentido vertical, y las dimensiones del espacio en direcciones horizontales. Para evitar confusiones, solo he trazado dos de las tres dimensiones espaciales, marcadas como x e y, porque empiezo a echar humo por las orejas si intento visualizar objetos tetradimensionales… La figura muestra la Luna moviéndose alrededor de la Tierra en una órbita circular. Para que la ilustración siga siendo comprensible, he representado la órbita mucho más pequeña que a escala real y he introducido varias simplificaciones[62]. El panel de la derecha muestra la vista de rana: cinco instantáneas del espacio con la Luna en

distintas posiciones, mientras que la Tierra permanece en el mismo sitio. El panel de la izquierda muestra la vista de pájaro: aquí el movimiento de la perspectiva de rana se sustituye por *formas* invariables en el espacio tiempo. Como la Tierra no se está moviendo, siempre permanece en el mismo lugar del espacio y, por tanto, forma un cilindro vertical en el espacio tiempo. La Luna es más interesante porque se manifiesta como una espiral dentro del espaciotiempo que cifra dónde está en distintos momentos. Por favor, observe los paneles izquierdo y derecho hasta hacerse una idea de la relación que mantienen entre ellos, porque es crucial para el resto de esta exposición. Para obtener instantáneas del espacio (derecha) a partir del espaciotiempo (izquierda) basta con tomar cortes horizontales del espaciotiempo en los instantes temporales que nos interesen.

Nótese que el espaciotiempo no existe dentro del espacio y el tiempo, sino que son estos, el espacio y el tiempo, los que existen dentro del primero. Yo defiendo que nuestra realidad física exterior es una estructura matemática, que es, por definición, una entidad abstracta, inmutable que existe fuera del espacio y del tiempo. Esta estructura matemática se corresponde con la vista de pájaro de nuestra realidad, no con la vista de rana, así que debería contener el espaciotiempo, y no solo el espacio. La estructura matemática contiene, además, otros elementos adicionales, tal como veremos más adelante, que se corresponden con la materia contenida dentro de nuestro espaciotiempo. Sin embargo, esto no altera su naturaleza atemporal: si la historia de nuestro universo fuera una partida de ajedrez, la estructura matemática no se correspondería con una configuración aislada, sino con toda la partida (figura 10.6). Si la historia de nuestro universo fuera una película, la estructura matemática no se correspondería con un único fotograma, sino con todo el DVD. Así que, desde la perspectiva de pájaro, las trayectorias de los objetos que se mueven en el espaciotiempo tetradimensional se parecen a una maraña de espaguetis. Allí donde la rana ve algo que se mueve a una velocidad constante, el pájaro ve un haz recto de espaguetis crudos. Allí donde la rana ve que la Luna orbita alrededor de la Tierra, el pájaro ve la espiral parecida a las hélices de pasta de la figura 11.1. Allí donde la rana ve cientos de miles de millones de estrellas girando alrededor de nuestra Galaxia, el pájaro ve cientos de miles de millones de espaguetis entrelazados. Para la rana, la realidad se describe mediante las leyes del movimiento y la gravitación de Newton. Para el pájaro, la realidad es la geometría de la pasta.

Pasado, presente y futuro

«¿Dónde estoy?». Supongo que, igual que yo, usted alguna vez se ha hecho esta pregunta. Cuando nos perdemos por completo solemos preguntar dónde estamos, con lo que reconocemos que no preguntamos sobre una propiedad del espacio, sino más bien sobre una propiedad nuestra: nuestra ubicación en el espacio en el momento en que formulamos la pregunta. De manera análoga, cuando preguntamos la hora (es decir, cuando preguntamos por el tiempo), en realidad no preguntamos por una propiedad del tiempo, sino por nuestra posición dentro del tiempo. El espaciotiempo contiene todos los lugares y todos los tiempos, de forma que *un* tiempo no es algo muy distinto de *un* lugar. Por tanto, sería más adecuado (desde un punto de vista científico, no sociológico) preguntar «¿Cuándo estoy?», en lugar de preguntar, ¿qué hora (qué tiempo) es? El espaciotiempo es como un mapa de la historia cósmica sin ningún indicador donde ponga «Usted está aquí». Si usted necesita un indicador de este tipo para orientarse, le recomiendo un teléfono provisto tanto de reloj como de GPS.

Cuando Einstein escribió que *«La diferencia entre pasado, presente y futuro es una ilusión, si bien una muy pertinaz»*, se refería a que esos conceptos no tienen ningún significado objetivo dentro del espaciotiempo. La figura 11.2 ilustra que cuando pensamos en el «presente» nos remitimos al corte temporal del espaciotiempo correspondiente al tiempo en el que efectuamos esa reflexión. Cuando hablamos del «futuro» y el «pasado» nos referimos a los cortes del espaciotiempo situados encima y debajo de ese corte. Se trata de un uso análogo al que hacemos de los términos *aquí, en frente de mí y detrás de* mí cuando aludimos a distintas partes del espaciotiempo en relación con la posición que ocupamos en el momento presente. La parte situada frente a usted no es menos real que la parte situada detrás de usted, de hecho, si va andando hacia delante, algo de lo que ahora está frente a usted quedará detrás en el futuro, y en el momento presente se encuentra detrás de otras personas. De forma similar, dentro del espaciotiempo el futuro es tan real como el pasado, partes del espaciotiempo que ahora mismo pertenecen a su futuro se situarán en su pasado más adelante. Como el espaciotiempo es estático e inmutable, no puede variar la condición de realidad de ninguna de sus partes, y todas sus partes tienen que ser igual de reales**[63]**.

En resumen, la ilusión no radica en el tiempo, sino en el fluir del tiempo, y lo mismo ocurre con el cambio. En el espaciotiempo, el futuro existe y el pasado no desaparece. Cuando se combina el espaciotiempo clásico de Einstein con la mecánica cuántica, se obtienen universos paralelos cuánticos,

tal como vimos en el capítulo 8. Esto significa que hay muchos pasados y futuros, todos ellos reales, pero ello no merma en absoluto la naturaleza matemática inmutable del conjunto completo de la realidad física.

Yo lo veo así. Pero, aunque esta idea de una realidad inmutable sea venerable y se remonte a Einstein, sigue siendo controvertida y continúa sometida a un debate científico intenso en el que científicos por los que siento gran respeto mantienen gran diversidad de posturas. Por ejemplo, en su libro *La realidad oculta*[64], Brian Greene expresa su inquietud ante el abandono de ideas como que el cambio y la creación son fundamentales cuando escribe: «Me inclino a pensar que existe un proceso, aunque sea provisional…, que podemos imaginar como generador del multiverso». Lee Smolin va más allá en su libro *Time Reborn* [Renacer del tiempo] al afirmar que no solo es real el cambio, sino que en verdad puede que el tiempo sea lo único real. En el otro extremo del espectro, Julian Barbour sostiene en su libro *The End of Time* [El final del tiempo] no ya que el cambio es ilusorio, sino que hasta se puede describir la realidad física sin introducir ni tan siquiera el concepto de tiempo.

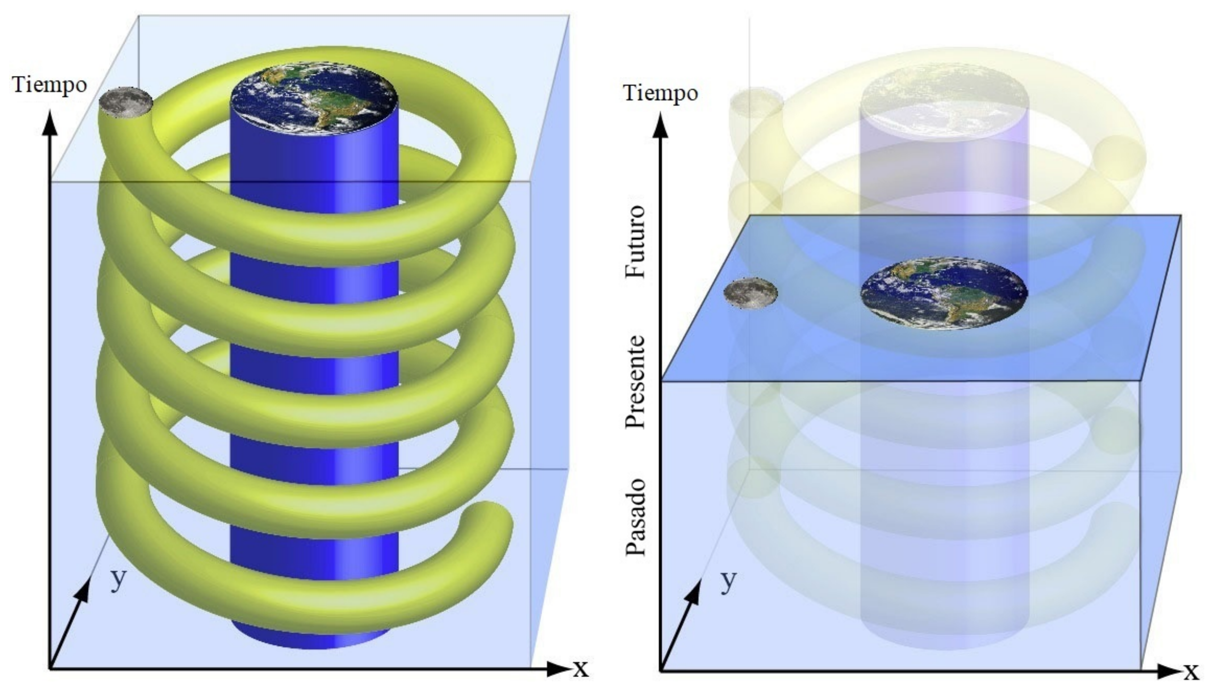


Figura 11.2: La diferencia entre pasado, presente y futuro existe tan solo en la vista de rana (derecha), pero no en la vista de pájaro de la estructura matemática (izquierda). En este segundo caso no cabe preguntar «¿Qué hora es?», sino tan solo «¿Dónde estoy?».

De qué modo son matemáticos el espaciotiempo y la «materia»

Con anterioridad hemos visto que el espaciotiempo se puede contemplar como una estructura matemática. Pero ¿y toda la materia inmersa *en* el espaciotiempo, como el libro que usted lee en este instante? ¿Cómo puede eso formar parte de una estructura matemática?

En los últimos años hemos visto que muchas cosas que parecían completamente ajenas a las matemáticas, como textos, sonidos, imágenes y películas, se pueden representar de forma matemática a través de computadoras, y transmitir por Internet convertidas en un conjunto de números. Veamos con más detalle cómo hacen eso las computadoras, porque la naturaleza funciona de un modo bastante similar para representar toda la materia que nos rodea.

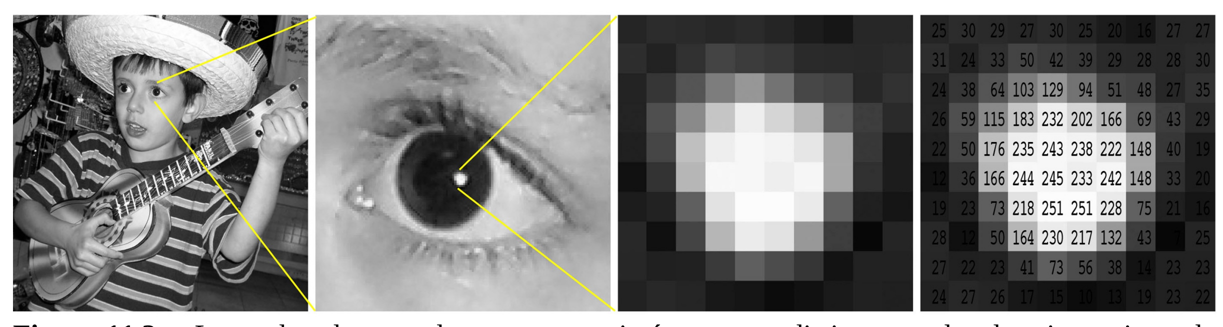


Figura 11.3: Los ordenadores suelen representar imágenes con distintas escalas de grises asignando un número a cada punto (píxel) de la imagen (panel situado más a la derecha). Cuanto mayor sea el número, más intensa es la luz procedente del píxel, de manera que 0 representa el color negro (ninguna luz en absoluto) y 255 representa el blanco. De manera similar, los llamados *campos* de la física clásica se representan mediante números en cada punto del espaciotiempo, que, en general, especifican la cantidad de materia existente en cada punto

Acabo de teclear la palabra *palabra*, y mi ordenador la ha plasmado en su memoria mediante la secuencia de siete números «112097108097098114097», porque representa cada letra minúscula mediante un número que es igual a 96 más el orden que le corresponde a cada letra dentro del alfabeto, de modo que $a = 097$, $p = 119$. Al mismo tiempo, el ordenador está reproduciendo la pieza *De Profundis*, del compositor estonio Arvo Pärt, que también representa mediante una secuencia de números que no se interpretan como letras, sino como las 44 100 posiciones distintas en las que deberá colocar las membranas de los altavoces cada segundo, y que a su vez crean las vibraciones del aire que los oídos y el cerebro interpretarán como sonido. En cuanto pulso la letra *p* en el teclado, el ordenador muestra la imagen visual de una *p* en la pantalla, y esa imagen también se representa mediante números. Aunque todas las imágenes que aparecen en la pantalla se vean lisas y continuas, en realidad la pantalla consiste en 1920×1200 píxeles distribuidos por una rejilla rectangular, tal como ilustra la figura 11.3, y el

color de cada píxel se representa mediante tres números, cada uno de ellos comprendido entre 0 y 255, que especifican las intensidades de la luz roja, verde y azul correspondiente a ese píxel; la combinación adecuada de esos tres colores genera todas las intensidades de todos los colores del arcoíris. Anoche, mientras mis hijos y yo veíamos un vídeo en YouTube, el ordenador no solo estaba dividiendo las dos dimensiones espaciales de la pantalla en píxeles, sino también la dimensión temporal, ya que iba troceando el tiempo en 30 fotogramas por segundo.

En el trabajo, los físicos creamos a menudo simulaciones de algún suceso en 3D, como huracanes, una explosión de supernova o la formación de un sistema planetario. Para ello dividimos el espacio tridimensional en píxeles 3D (también llamados *vóxeles*). Asimismo, dividimos el espaciotiempo tetradimensional en vóxeles 4D. Cada uno de esos vóxeles en 4D simboliza lo que está ocurriendo en un lugar concreto y un tiempo determinado mediante un grupo de números que codifican todo lo relevante, como la temperatura, la presión, y las densidades y velocidades de diferentes sustancias dentro del vóxel. Por ejemplo, en una simulación del Sistema Solar, un vóxel correspondiente al centro del Sol tendrá un número de temperatura extremadamente alto, y un vóxel fuera del Sol que contenga espacio casi vacío tendrá un número de presión cercano al cero. Los números de vóxeles vecinos cumplen ciertas relaciones que se captan mediante ecuaciones matemáticas, y cuando un ordenador efectúa una simulación, emplea esas relaciones para rellenar los números que faltan, como cuando se completa un sudoku. Cuando una computadora efectúa una previsión meteorológica, los vóxeles espaciotemporales correspondientes a ahora mismo se rellenan con las cantidades medidas para la presión del aire, la temperatura del aire, etc. Entonces el ordenador aplica las ecuaciones relevantes para calcular los números que ocupan los vóxeles espaciotemporales correspondientes a mañana y el resto de la semana.

Aunque estas simulaciones reproducen en términos matemáticos algunos aspectos de nuestra realidad física externa, lo hacen tan solo de manera aproximada. Desde luego, el espacio tiempo no consiste en los rudimentarios vóxeles que usamos para efectuar simulaciones del tiempo que hará mañana, y esta es una de las razones por las que los partes meteorológicos suelen ser inexactos. Pero esta idea de que hay un conjunto de números en cada punto del espaciotiempo es bastante profunda, y creo que nos está diciendo algo no ya sobre nuestra *descripción* de la realidad, sino sobre la realidad en sí.

Uno de los conceptos más relevantes de la física moderna es el de *campo*, que no es más que esto: algo representado por números en cada punto del espaciotiempo. Por ejemplo, existe un *campo de temperatura* correspondiente al aire que nos circunda: hay una temperatura bien definida en cada punto, totalmente independiente de los vóxeles inventados por los humanos, y ese número de temperatura se puede medir poniendo un termómetro en ese lugar, o un dedo, si no necesitamos una gran precisión. También existe un *campo de presión*: en cada punto hay un número de presión que se puede medir con un barómetro, o con el oído, que dolerá si el número es demasiado extremo y que detectará sonido si la presión fluctúa con el tiempo.

Ahora sabemos que ninguno de esos dos campos son fundamentales: no son más que diferentes mediciones de la rapidez con que se mueven en promedio las moléculas de aire, de modo que estos números dejan de estar bien definidos si se miden a escalas subatómicas. Sin embargo, existen otros campos que parecen bastante fundamentales y que forman parte del mismísimo tejido de nuestra realidad física exterior. Veamos, como primer ejemplo, el *campo magnético*. Este está representado mediante tres números en cada punto del espaciotiempo (y no uno, como la temperatura) que codifican tanto una intensidad como una dirección. Es muy probable que alguna vez haya medido usted este campo con una brújula cuyo puntero magnético se alinea con el campo magnético de la Tierra, que apunta al norte. El puntero se alinea más rápido si el campo magnético es más intenso, como cerca de una máquina de toma de imágenes por resonancia magnética. Un segundo ejemplo lo constituye el *campo eléctrico*, que también se representa mediante un trío de números que codifican intensidad y dirección. Una forma sencilla de medirlo es a través de la fuerza que ejerce sobre un objeto con carga eléctrica, como cuando el pelo se eriza atraído por la electricidad de un peine de plástico. Estos campos eléctrico y magnético se pueden unificar con elegancia en lo que se conoce como *campo electromagnético*, representado mediante seis números en cada punto del espaciotiempo. Tal como comentamos en el capítulo 7, la luz no es más que una onda que se propaga a través del campo electromagnético, de modo que si el mundo físico es una estructura matemática, entonces toda la luz de este universo nuestro (que parece bastante físico) se corresponde con seis números en cada punto del espaciotiempo (lo que parece bastante matemático). Estos números cumplen las relaciones matemáticas que conocemos como ecuaciones de Maxwell, ilustradas en la figura 10.4.

Hay que hacer una salvedad aquí: lo que acabo de describir se corresponde con la interpretación que daba la física clásica a la electricidad, el magnetismo y la luz. La mecánica cuántica complica este cuadro, pero sin tornarlo menos matemático, sustituyendo el electromagnetismo clásico por la *teoría cuántica de campos*, los cimientos de la física de partículas moderna. En la teoría cuántica de campos, la función de onda especifica en qué medida es real cada configuración posible de los campos eléctrico y magnético. Esta función de onda es en sí misma un objeto matemático, un punto abstracto dentro del espacio de Hilbert.

Como vimos en el capítulo 7, la teoría cuántica de campos dice que la luz se compone de partículas llamadas fotones y, a grandes rasgos, cabe pensar que los números que constituyen los campos eléctrico y magnético especifican cuántos fotones hay en cada tiempo y lugar. Del mismo modo que la intensidad del campo electromagnético corresponde a la cantidad de fotones que hay en cada momento y lugar, existen otros campos que se corresponden con todas las demás partículas elementales conocidas. Por ejemplo, la intensidad del *campo de electrones* y del *campo de quarks* guarda relación con la cantidad de electrones y quarks que hay en cada tiempo y lugar. De este modo, todos los movimientos de todas las partículas de todo el espaciotiempo se corresponden en la física clásica con un conjunto de números para cada punto de un espacio matemático tetradimensional, una estructura matemática. En la teoría cuántica de campos, la función de onda especifica en qué medida es real cada configuración posible de cada uno de esos campos.

Como dijimos en el capítulo 7, los físicos aún no hemos encontrado una estructura matemática capaz de describir todos los aspectos de la realidad, incluida la gravitación, pero de momento no hay ningún indicio de que la teoría de cuerdas ni cualquier otra candidata a encarnar tal descripción sea menos matemática que la teoría cuántica de campos.

Descripción, frente a equivalencia

Antes de continuar, debemos resolver un problema semántico importante. Mientras que la mayoría de mis colegas físicos dirían que nuestra realidad física exterior *se describe* (al menos de manera aproximada) en términos matemáticos, lo que sostengo es que *es* matemáticas (más en concreto, una estructura matemática). En otras palabras, hago una afirmación mucho más rotunda. ¿Por qué?

Todo lo que he dicho hasta ahora en este capítulo sugiere que nuestra realidad física exterior se puede *describir* como una estructura matemática. Si un manual futuro de física portara la anhelada teoría del todo, entonces sus ecuaciones serían una descripción completa de la estructura matemática que es la realidad física exterior. Escribo aquí *es*, en lugar de *se corresponde con*, porque si dos estructuras son equivalentes, entonces no hay ningún sentido en el que no sean una misma cosa, tal como enfatiza el filósofo israelí Marius Cohen[65]. Recordemos la trascendente noción de equivalencia matemática que describimos en el capítulo 10, que encarna la mismísima esencia de las estructuras matemáticas: si dos descripciones completas son equivalentes, entonces describen una misma cosa[66]. Esto significa que si algunas ecuaciones matemáticas describen por completo tanto nuestra realidad física exterior como una estructura matemática, entonces nuestra realidad física exterior y la estructura matemática son una misma cosa, y entonces la hipótesis del universo matemático es cierta: nuestra realidad física exterior es una estructura matemática.

Recuerde que dos estructuras matemáticas son equivalentes si sus entidades se pueden emparejar de algún modo que preserve todas las relaciones. Por tanto, cada entidad de la realidad física exterior se puede emparejar con otra equivalente en una estructura matemática (por ejemplo, esta intensidad del campo eléctrico que se da en este lugar del espacio físico se corresponde con este número dentro de la estructura matemática), entonces nuestra realidad física exterior concuerda con la definición de estructura matemática, de hecho, esa misma estructura matemática.

Ya vimos en el capítulo 10 que quien quiera negarse a aceptar la hipótesis del universo matemático puede hacerlo rechazando la hipótesis de la realidad exterior, según la cual existe una realidad física exterior completamente independiente de los humanos. Esa persona podría aducir entonces que nuestro universo se compone en cierto modo de materia que se describe a la perfección mediante una estructura matemática, pero que también posee otras propiedades que no se describen a través de ella y que no admiten una descripción abstracta, independiente de los seres humanos, libre de cualquier bagaje. Sin embargo, yo creo que este punto de vista revolvería en su tumba al filósofo Karl Popper del capítulo 6, porque él hacía hincapié en que las teorías científicas tienen que tener efectos observables. En cambio, como la descripción matemática es supuestamente perfecta porque explica todo lo observable, todo ese aparato adicional que haría no matemático nuestro

universo no tendría, por definición, ningún efecto observable en absoluto, lo que lo convertiría en acientífico al 100 %.

¿Qué somos?

Acabamos de ver que tanto el espaciotiempo como la materia que hay en él se pueden concebir como parte de una estructura matemática. Pero ¿y *nosotros*? Nuestros pensamientos, nuestras emociones, la consciencia que tenemos de nosotros mismos y ese hondo sentimiento existencial de *yo soy*, nada de todo eso parece matemático en lo más mínimo. Sin embargo, también nosotros estamos hechos de la misma clase de partículas elementales que conforman todo lo que hay en este mundo físico, las cuales hemos afirmado que son puramente matemáticas. ¿Cómo se compagina todo esto?

En mi opinión, aún no tenemos un conocimiento completo de lo que somos. Es más, tal como comentamos en el capítulo 9, ni siquiera necesitamos desentrañar todos los misterios de la consciencia para comprender la realidad física exterior. A pesar de ello, creo que la física moderna ha aportado algunas pistas interesantes sobre maneras válidas de contemplarnos a nosotros mismos en las que ahondaremos a continuación.

La trenza de la vida

George Gamow, el precursor de la cosmología con el que nos topamos en el capítulo 3, tituló su autobiografía *My World Line* [Mi línea de universo], una expresión que también utilizó Einstein para referirse a trayectorias dentro del espaciotiempo. Pero, en un sentido estricto, la línea de universo de cada uno de nosotros no es una línea: ni tiene un grosor cero, ni es recta. Veamos en primer lugar las 10^{29} partículas elementales aproximadas (quarks y electrones) que conforman nuestro cuerpo. Todas juntas crean una figura en forma de tubo a través del espaciotiempo análoga a la espiral de la órbita lunar de la figura 11.1, pero más compleja, lo que refleja el hecho de que nuestro movimiento desde el nacimiento hasta la muerte es más enrevesado que el de la Luna. Por ejemplo, si nadamos varios largos en una piscina, esa parte de nuestro tubo espaciotemporal tiene forma de zigzag, y si usamos un columpio de un parque infantil, esa parte del tubo espaciotemporal tiene forma de serpentina.

No obstante, la propiedad más interesante de nuestro tubo espaciotemporal no es esa forma abultada, sino su estructura interna, de una complejidad extrema. Mientras que las partículas que conforman la Luna permanecen unidas en una disposición más bien estática, muchas de nuestras partículas se mantienen en movimiento constante unas respecto de las otras.

Consideremos, por ejemplo, las partículas que conforman los glóbulos rojos. A medida que la sangre circula por el cuerpo para aportar el oxígeno que necesitamos, cada glóbulo rojo traza su propia forma tubular única a través del espaciotiempo, la correspondiente a su intrincado recorrido por las arterias, vasos capilares y venas con retornos regulares al corazón y los pulmones. Esos tubos espaciotemporales de cada glóbulo rojo distinto se entrelazan y crean un patrón con forma de trenza (figura 11.4, panel central) mucho más elaborada que cualquier cosa que pueda contemplarse jamás en una peluquería: si una trenza convencional consiste en tres cabos con tal vez 30 000 cabellos cada uno que se entrelazan siguiendo un sencillo patrón repetitivo, esta trenza espaciotemporal consiste en billones de cabos (uno por cada glóbulo rojo) cada uno de ellos formado por billones de trayectorias finas como cabellos de partículas elementales que se entrelazan siguiendo un complejo patrón que nunca se repite. En otras palabras, si nos pasáramos un año haciéndole un peinado verdaderamente demencial a una amiga que consistiera en trenzarle el pelo entrelazando no cabos sino cada cabello por separado, el patrón resultante seguiría siendo muy simple en comparación.

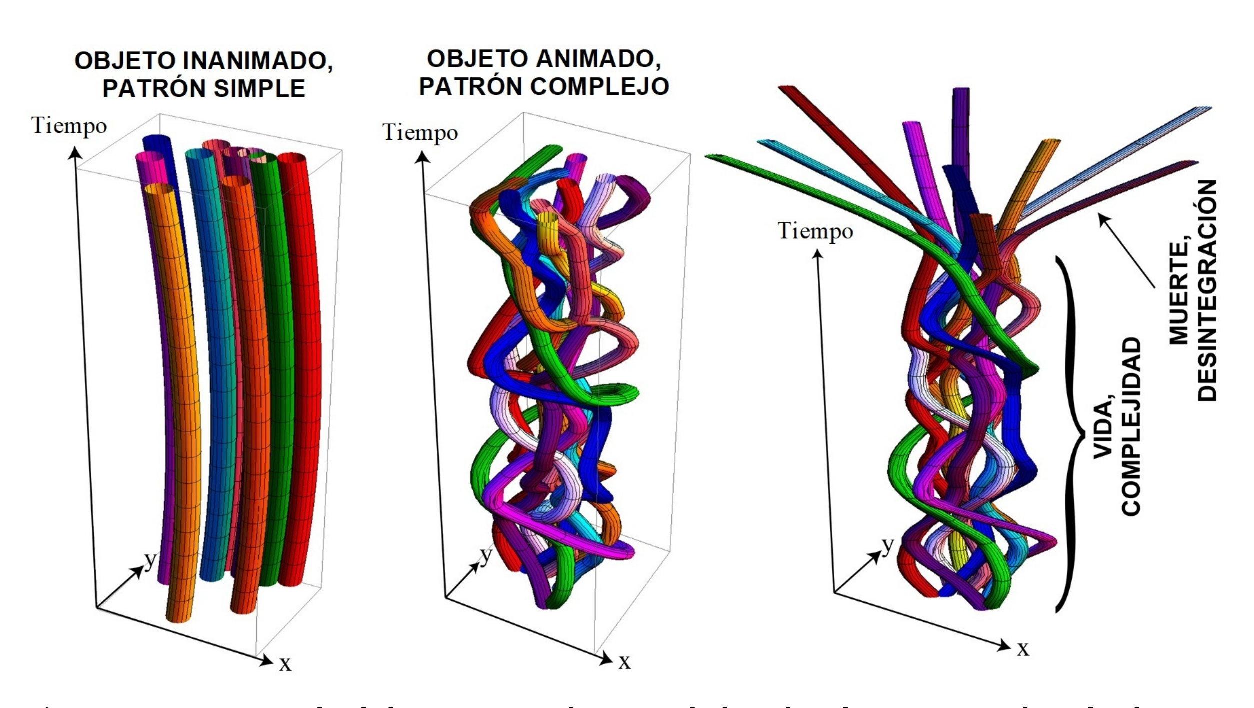


Figura 11.4: La complejidad es un rasgo distintivo de la vida. El movimiento de cada objeto se corresponde con un patrón en el espaciotiempo. Un conjunto inanimado de 10 partículas acelerándose hacia la izquierda crea un patrón simple (izquierda), mientras que las partículas que conforman un

organismo vivo constituyen un patrón complejo (centro) que se corresponde con los enrevesados movimientos que efectúan el procesamiento de información y otros procesos vitales. Cuando un organismo vivo muere, acaba desintegrándose y sus partículas se separan unas de otras (derecha). Estas toscas ilustraciones solo muestran 10 partículas; el patrón espaciotemporal de cada ser humano consta de unas 10^{29} partículas y tiene una complejidad delirante.

Sin embargo, la complejidad de todo ello se queda en nada frente a los patrones que genera el procesamiento de información dentro del cerebro. Tal como expusimos en el capítulo 8 y como se ilustra en la figura 8.7, los 100 000 millones aproximados de neuronas que tenemos producen señales eléctricas sin cesar («descargas»), lo que implica la redistribución de miles de millones de billones de átomos, en particular iones de sodio, potasio y calcio. Las trayectorias de esos átomos forman una trenza extremadamente elaborada a través del espaciotiempo cuyo complejo entrelazamiento corresponde a almacenar y procesar información de manera que genere la sensación de consciencia de nosotros mismos que nos es tan familiar. La comunidad científica admite en general que aún no sabemos cómo funciona todo esto, de modo que es justo afirmar que los humanos aún no tenemos un conocimiento completo de lo que somos. Sin embargo, a grandes rasgos cabría decir que *somos un patrón en el espaciotiempo*. Un patrón matemático. En concreto, somos una trenza en el espaciotiempo, una de las más enmarañadas que se conocen.

A alguna gente le causa gran desagrado emocional verse como una acumulación de partículas. De hecho, me reí mucho una vez que mi amigo Emil llamó *atomhög* ('montón de átomos' en sueco) a mi amigo Mats con la intención de insultarlo cuando éramos veinteañeros. En cambio, si alguien dijera «¡No me creo que solo seamos un montón de átomos!», yo me opondría al empleo del término *solo:* la elaborada trenza espaciotemporal correspondiente a una mente humana es, sin lugar a dudas, el patrón con la complejidad más excelsa que hayamos detectado jamás en nuestro universo. Los patrones espaciotemporales de la computadora más veloz del mundo, el Gran Cañón de Colorado o incluso el Sol son simples comparados con el nuestro.

Aunque muchas de las partículas que nos conforman mantienen un movimiento complejo constante correspondiente al hecho de que estamos vivos, otras se mueven de maneras menos elaboradas, como las muchas que conforman la piel y que evitan que otras partículas se separen. Esto significa que nuestro tubo espaciotemporal se parece un poco a esos cables eléctricos con hebras interiores entrelazadas donde el aislamiento exterior que comparten recuerda a un tubo hueco. Es más, reemplazamos la mayoría de las

partículas con regularidad. Por ejemplo, alrededor de tres cuartas partes del peso del cuerpo humano consisten en moléculas de agua, la cual se renueva por completo más o menos de mes en mes, y las células dérmicas y los glóbulos rojos se renuevan cada pocos meses. Dentro del espaciotiempo, esas partículas que confluyen en nuestro cuerpo y después salen de él conforman un patrón que recuerda a las barbas de las vainas en las que están envueltas las mazorcas de maíz. A ambos extremos de nuestra trenza espaciotemporal, que se corresponden con nuestro nacimiento y muerte, todas las hebras se separan de manera gradual, lo que se corresponde con la unión, interacción y por último la separación por caminos propios de todas las partículas que nos conforman (figura 11.4, derecha). Esto asemeja la estructura espaciotemporal del conjunto de nuestra vida a la de un árbol: en la base, que representa las primeras etapas, aparece un elaborado sistema de raíces que se corresponde con las trayectorias espaciotemporales de muchas partículas que poco a poco se fusionan en hebras más gruesas y culminan en un tronco único en forma de tubo que representa el cuerpo actual (con un claro patrón trenzado en su interior, tal como describimos antes). En la parte superior, que sería lo más reciente, el tronco se divide en ramas cada vez más finas que equivalen a la toma de caminos distintos por parte de cada partícula una vez que perdemos la vida. En otras palabras, el patrón de la vida solo tiene una extensión finita a lo largo de la dimensión del tiempo y la trenza se deshace en un encrespamiento por ambos extremos.

Todos los patrones que hemos mencionado existen, por supuesto, en cuatro dimensiones más que en tres, y las metáforas de las trenzas, cables y árboles no deben interpretarse con demasiada literalidad. El punto clave se reduce a que usted puede ser un patrón inmutable dentro del espaciotiempo (los detalles específicos de ese patrón son menos relevantes para los puntos que estamos recalcando aquí). Este patrón forma parte de la estructura matemática que es nuestro universo, y las relaciones entre diferentes partes del patrón se encuentran codificadas en ecuaciones matemáticas. Tal como vimos en el capítulo 8, la mecánica cuántica de Everett nos dota de una estructura más interesante aún (aunque no menos matemática), porque un solo yo (el tronco del árbol) se puede dividir en muchas ramas de forma que cada una de ellas sienta que es el único y verdadero yo (retomaremos esto más adelante).

Vive el momento

Acabamos de ver que el espacio en sí, la materia que contiene y hasta nosotros mismos podemos formar parte de una estructura matemática. Pero hemos pagado un precio para ello: hemos tenido que abandonar la conocida sensación de que el tiempo fluye, considerarla una mera ilusión, y concebir el tiempo como una cuarta dimensión dentro de una estructura matemática inmutable. Entonces, ¿cómo conciliaríamos eso con la experiencia subjetiva de que las cosas cambian de un momento para otro?

Todas nuestras percepciones subjetivas existen dentro del espaciotiempo, del mismo modo que todas las escenas de una película existen dentro de su DVD. En particular, el espaciotiempo contiene un gran número de patrones en forma de trenza que se corresponden con percepciones subjetivas tanto en distintos lugares, correspondientes a diferentes personas, como en distintos momentos. Llamaremos «momento del observador» a cada una de esas percepciones. Recurrí a una expresión diferente para aludir a esto mismo en mi artículo de 1996 sobre el universo matemático, pero me gusta más *momento del observador*, y Nick Bostrom y otros filósofos han normalizado su uso en este contexto en los últimos años. Sabemos por experiencia que algunos de esos momentos del observador parecen conectados y fundidos en una secuencia aparentemente ininterrumpida que se corresponde con lo que denominamos *nuestra vida*. Sin embargo, esa sensación suscita interrogantes difíciles. *¿Cómo funciona esa conexión?* En particular ¿hay alguna clase de regla para que los momentos del observador parezcan conectados? Y ¿por qué esa secuencia conectada de momentos del observador crea la sensación subjetiva de que el tiempo fluye?

Una suposición obvia podría ser que la conexión guarda relación con la continuidad: que dos momentos del observador se perciben conectados si son adyacentes en el espacio tiempo y forman parte del mismo patrón. En cambio, la figura 11.5 ilustra que la cuestión es más espinosa de lo que parece en un principio, y que la respuesta no puede ser tan simple. En primer lugar, el momento del observador que se corresponde con mi despertar (etiquetado como *C*) parece conectado con el correspondiente al momento en que me dormí (marcado como *B*). Es decir, yo tengo la sensación de que *C* es la continuación de *B*, aunque esos dos momentos del observador no caigan cerca uno de otro en ninguna parte dentro del espacio tiempo. En segundo lugar, hay muchos otros momentos del observador (correspondientes a percepciones de otras personas que viajan en el mismo vuelo) que son mucho más cercanas a *C* tanto en el espacio como en el tiempo, entonces ¿por qué *C* no parece conectado con uno de esos otros momentos del observador? En tercer lugar,

imagine que ensamblan un clon perfecto de mí mientras duermo, con todas las partículas en la misma configuración, solo que localizadas en otro avión de un aspecto idéntico. Entonces la percepción subjetiva de mi clon después de despertar será subjetivamente idéntica a la que tuviera yo en *C*, así que por definición también él se sentirá conectado a *B* aun cuando su patrón espaciotemporal no lo esté[67].

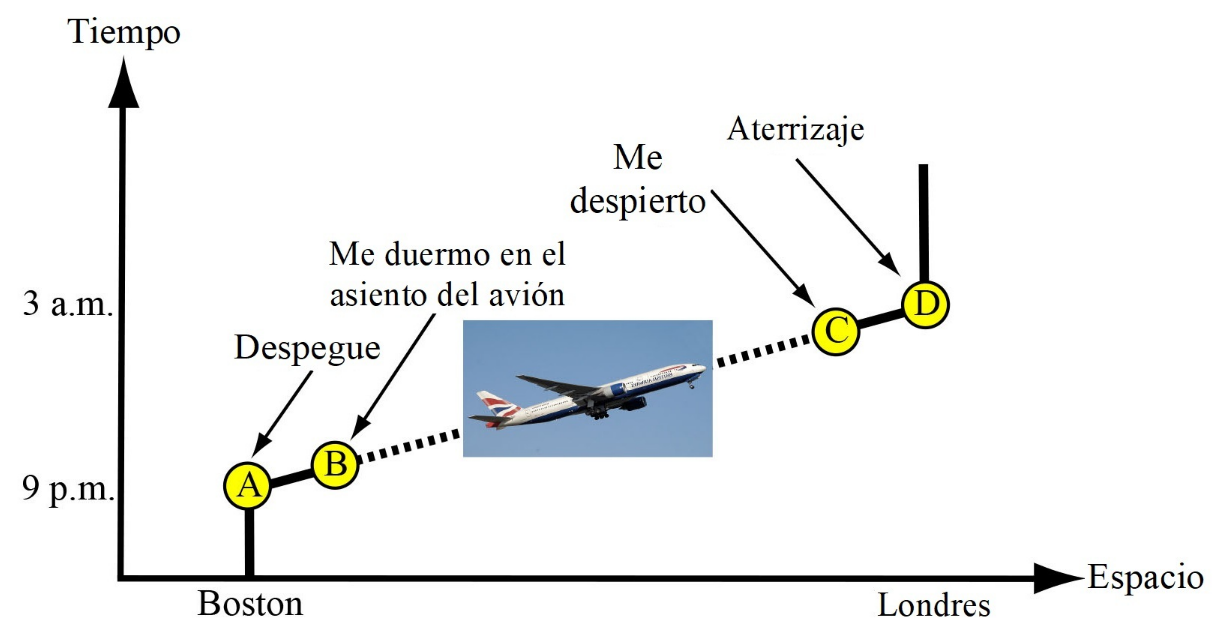


Figura 11.5: Mi línea de universo durante un vuelo a Londres. Despego (*A*), me duermo poco después (*B*) y me despierto (*C*) poco antes de aterrizar (*D*). Aunque la percepción de mi consciencia en *C* está en un punto distinto que en *B*, tanto en el espacio como en el tiempo, parece mantener una conexión ininterrumpida con la última percepción de mi consciencia en *B*, pero no con el gran número de percepciones conscientes adicionales (del resto de pasajeros) mucho más próximas a *C* que a *B* tanto en el espacio como en el tiempo.

Esto sugiere que el asunto de la continuidad es una pista falsa, y que sencillamente no existe ningún proceso físico nuevo por descubrir que de alguna manera haga que ciertos momentos del observador se perciban conectados, y que explique así la sensación familiar de que el tiempo fluye. Por suerte hay una explicación más simple que no requiere ninguna física nueva y que analizaremos a continuación. La combinación de la hipótesis del universo matemático con nuestras experiencias subjetivas nos dice que hay estructuras muy complejas en forma de trenza dentro del espaciotiempo que son conscientes de sí mismas y que subjetivamente se perciben como momentos del observador. Sabemos que esas estructuras pueden estar bastante localizadas tanto en el espacio como en el tiempo: el cerebro ocupa poco más que un litro de volumen, y el tiempo que tarda el cerebro en tener pensamientos o sensaciones individuales suele rondar una décima de segundo,

con un factor de 10 arriba o abajo. Esto significa que la percepción subjetiva de un momento del observador depende tan solo de lo que haya justo ahí, en esa región localizada del espaciotiempo, no de lo que haya en otras partes del espacio (como la realidad exterior que vemos a nuestro alrededor), ni tampoco de lo que haya en otras partes del tiempo (como lo que experimentamos varios segundos antes). Sin embargo, las componentes cruciales de nuestras percepciones conscientes guardan relación con ambos: ahora mismo usted es consciente del libro que tiene ante sí y de la frase que leyó hace cinco segundos, por mucho que ninguno de los dos pertenezca a la pequeña región espaciotemporal que constituye el momento del observador presente. En otras palabras, parece que la percepción subjetiva de cada uno de nuestros momentos del observador guarda relación con lo que hay en otros lugares tanto del espacio como del tiempo, aunque supuestamente no guarden relación con ninguno de ellos. ¿Cómo es posible?

Ya hablamos de la vertiente espacial de esta paradoja en el capítulo 9, y llegamos a la conclusión de que nuestra consciencia no observa en realidad el mundo exterior, sino más bien un modelo elaborado de la realidad que albergamos en el cerebro y que se actualiza de manera continua mediante las aportaciones de los órganos sensitivos para rastrear lo que está ocurriendo en realidad en el mundo exterior[68]. De modo que el patrón espaciotemporal correspondiente al momento actual del observador incluye el estado en el que se encuentra el modelo de la realidad del observador en cuestión en este instante preciso. Tal como ilustra la figura 11.6, sucede algo muy parecido con la vertiente temporal: nuestro modelo del mundo incluye no solo información sobre el estado actual de lo que nos rodea, sino también recuerdos de cómo era ese entorno en el pasado. Cada una de las ocho tiras de película representa un solo momento del observador. Cada una de ellas cuenta con una imagen nítida de lo que está ocurriendo en este instante y con recuerdos cada vez más difusos de lo que sucedió en el pasado. Por tanto, en este preciso instante tenemos consciencia de una secuencia temporal completa de sucesos. Del mismo modo que nuestro modelo de la realidad espacial nos dota de la percepción subjetiva de que vemos un espacio tridimensional, aunque lo cierto es que la mente ve el modelo de realidad albergado en el cerebro, este modelo de realidad temporal y su secuencia de recuerdos nos dota de la percepción subjetiva de que el tiempo fluye a través de una secuencia de sucesos, aunque lo cierto es que la mente ve el modelo de realidad que alberga el cerebro en un solo momento del observador.

En otras palabras, la percepción subjetiva de que el tiempo fluye proviene de las relaciones entre los recuerdos que tenemos en cada instante preciso. Imagine un experimento mental en el que confeccionemos un clon idéntico a mí, dormido y provisto de todos mis recuerdos, y que permanezca despierto tan solo el tiempo necesario para experimentar un único momento del observador. A pesar de ello sentirá que el tiempo ha fluido desde un pasado complejo e interesante, aunque solo haya experimentado ese único momento. Esto significa que las percepciones subjetivas de la duración y el cambio son qualia, percepciones instantáneas básicas idénticas a la rojez, la blancura o la dulzura.

Esta implicación de la hipótesis del universo matemático es bastante extrema, así que deje de leer un momento, por favor, para asimilarla y meditarla. Eso de lo que somos conscientes en este preciso instante no lo percibimos como una fotografía, sino como una película, y esa película no es la realidad, solo existe en la cabeza de cada cual, como parte del modelo de realidad de cada cerebro particular. Contiene gran cantidad de información sobre la verdadera realidad física exterior (a menos que estemos soñando o alucinando), pero sigue siendo una versión muy modificada de la realidad, como las noticias vespertinas de la televisión, que contiene sobre todo ciertos detalles relevantes de patrones cercanos en el espacio y en el tiempo de los que, según el cerebro, nos conviene ser conscientes.

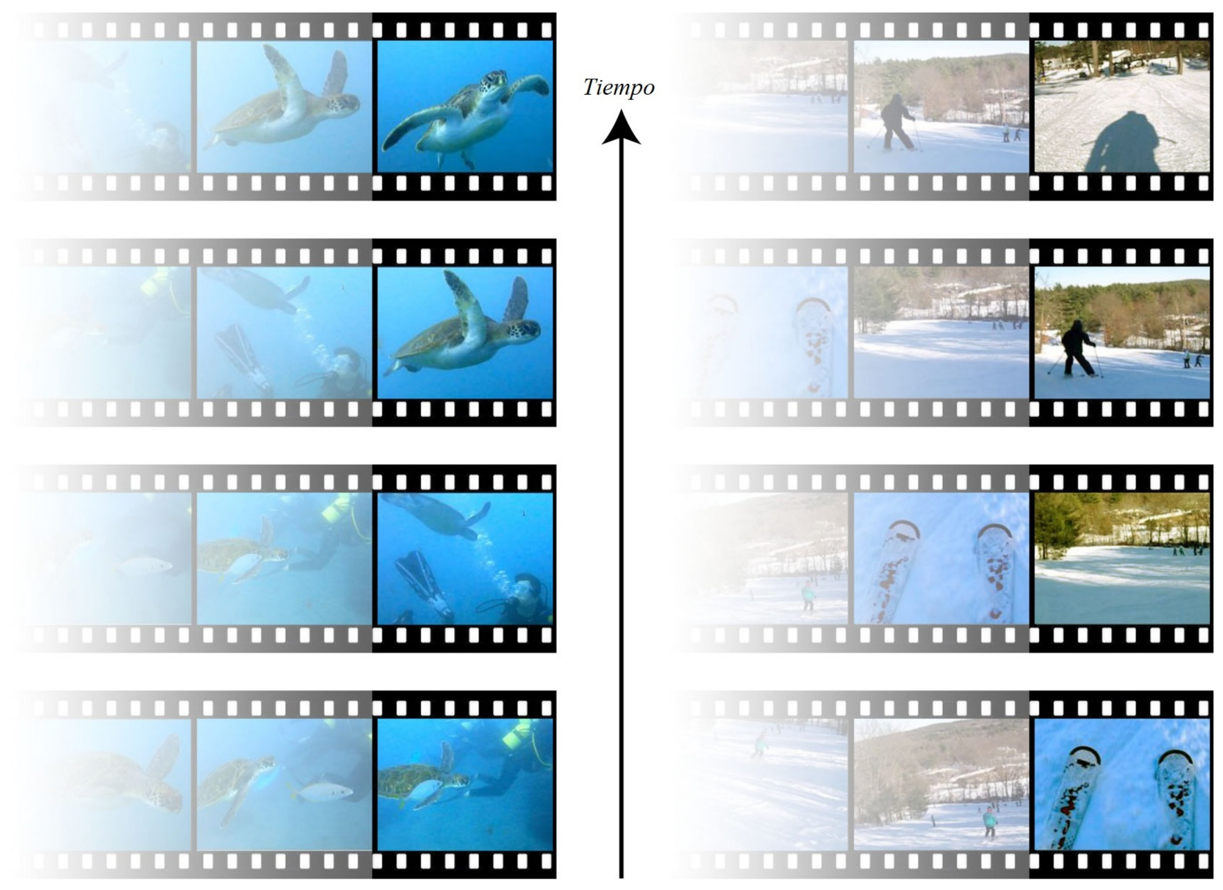


Figura 11.6: Percepciones subjetivas dentro del espaciotiempo (momentos del observador) de un buceador y de un esquiador en cuatro instantes diferentes. Cada tira de película se corresponde con un solo momento del observador e incluye tanto una imagen nítida de lo que está ocurriendo ahora mismo como recuerdos cada vez más difusos de lo que ocurrió en el pasado. Si reordenara las ocho tiras al azar, sería fácil reconstruir las secuencias debido a las relaciones que mantienen entre ellas: las impresiones visuales actuales (toma de la derecha) en algunos momentos del observador concuerdan con el recuerdo de otras.

Igual que cuando vemos las noticias en televisión, no vemos de manera directa partes distantes del espacio: solo vemos una película modificada *sobre* esas partes del espacio. De igual modo, no vemos el pasado, sino una película modificada *sobre* el pasado. A diferencia de cuando vemos las noticias durante varios minutos, el noticiario interno se ve *de una sola vez*, así que somos conscientes de forma simultánea de hechos presentes y pasados. Un segundo después, volvemos a ver el noticiario interno, de una sola vez, y apenas ha cambiado, como una reposición televisiva, pero sí habrá experimentado ligeras modificaciones para incorporar otro segundo de material al final y acortar el resto. En otras palabras, aunque cada momento del observador ocupe objetivamente menos de un litro de volumen, subjetivamente se percibe como si ocupara todo el espacio del que tenemos consciencia y todo el tiempo de nuestros recuerdos. Tenemos la impresión de estar observando ese espacio y tiempo desde aquí y ahora, pero todo ese

espacio y tiempo solo forman parte del modelo de realidad que estamos experimentando. Esto se debe a que tenemos la percepción subjetiva de que el tiempo fluye, aunque no lo haga.

Consciencia de uno mismo

Es más, también nosotros estamos dentro de la película, porque nuestro modelo de realidad incluye un modelo de nosotros mismos (por eso no solo tenemos consciencia, sino también consciencia de nosotros mismos). Esto significa que cuando usted percibe que mira el libro, lo que ocurre en realidad es que el modelo de realidad del cerebro tiene su modelo de usted mirando su modelo del libro, tal como ilustra la figura 11.7. Y esto nos conduce a la pregunta última sobre la consciencia: ¿quién contempla el modelo de realidad del cerebro para dar lugar a la consciencia subjetiva? Mi predicción es: *¡nadie!* Si hubiera otra parte del cerebro que de verdad contemplara todo el modelo de realidad y fuera consciente de toda la información que contiene, entonces esa región del cerebro necesitaría transferir físicamente toda esa información a su propia copia local. Eso supondría un desperdicio inmenso de recursos desde un punto de vista evolutivo, y no hay ningún indicio en la investigación neurocientífica de semejante duplicación derrochadora. Es más, tampoco respondería el interrogante: si de verdad se necesitara un observador, entonces ese modelo de realidad duplicado necesitaría a su vez que un espectador fuera percibido subjetivamente, lo que nos llevaría a otro problema de regresión infinita.

Yo creo que la respuesta es bien sencilla: no se necesita ningún observador porque la consciencia de cada cual *es* básicamente el modelo de realidad de cada uno. *Creo que la consciencia es la forma en que se percibe la información cuando se procesa de ciertas maneras complejas*. Como las distintas partes del cerebro interaccionan entre sí, distintas partes del modelo de realidad pueden interaccionar entre sí, de manera que el modelo de uno mismo puede interaccionar con el modelo que tenemos del mundo exterior, lo que crea la sensación subjetiva de que el primero percibe el segundo. Cuando miro una fresa, tengo una percepción subjetiva muy real del modelo del color rojo que porto en el cerebro, y lo mismo ocurre con el modelo que porto en el cerebro de mi propia mente, la cual percibo como un punto de vista privilegiado. Ya sabemos que el cerebro tiene una creatividad sorprendente a la hora de que los mismos tipos básicos de señales eléctricas en un grupo de neuronas se interpreten como qualia percibidas de maneras muy diferentes: como colores, sonidos, olores, sabores y sensaciones táctiles, dependiendo de

si el grupo de neuronas proviene de los ojos, los oídos, la nariz, la boca o la piel. La diferencia principal no estriba en las neuronas que transmiten la información, sino en los patrones con los que están conectadas. Por eso, aunque tengamos una percepción completamente distinta de nosotros mismos que de una fresa, es bien posible que a un nivel fundamental sean la misma cosa: patrones complejos dentro del espacio tiempo. Dicho de otro modo, creo que esas percepciones que tenemos de nosotros mismos, esa atalaya privilegiada que llamamos «yo», son qualia igual que lo son nuestras percepciones subjetivas de «rojo» o «verde». En resumen, tanto el color rojo como la consciencia de nosotros mismos son qualia.

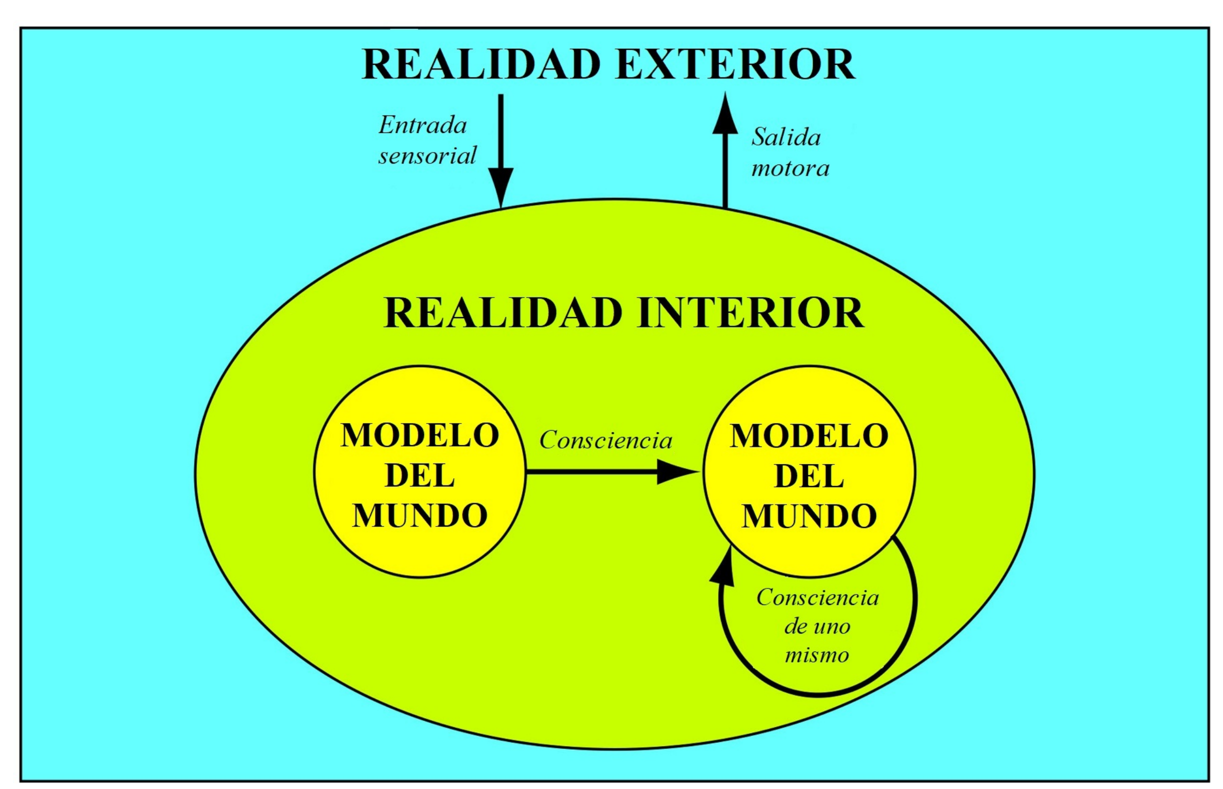


Figura 11.7: Creo que la consciencia es la forma en que percibimos la información cuando se procesa de ciertas maneras complejas, y que tipo particular de consciencia que percibimos subjetivamente los humanos aparece cuando el modelo cerebral que tenemos de nosotros mismos interacciona con el modelo cerebral que tenemos del mundo. Las flechas de la figura indican el flujo de información. Por ejemplo, la entrada de información desde los sentidos contribuye sin cesar a que el modelo que tenemos del mundo rastree aspectos clave de lo que está ocurriendo de verdad en la realidad exterior, y la salida de información a través de la corteza motora controla los músculos para influir en la realidad exterior, por ejemplo, pasando la página de este libro.

Predecir el futuro

Una de las metas principales de la ciencia y, de hecho, uno de los motivos principales de tener cerebro, es predecir el futuro. Pero si el tiempo no fluye, entonces ¿a qué nos referimos cuando hablamos de predecir el futuro?

La figura 11.6 ilustra cómo reformular esto como una cuestión razonable incluso prescindiendo de las nociones de mudanza o flujo del tiempo. Los ocho momentos del observador que aparecen en ella pertenecen a dos personas distintas, una que bucea y otra que esquía, y cada uno de ellos se corresponde con un largo patrón espaciotemporal en forma de trenza. Al comparar los ocho momentos del observador se aprecian algunas relaciones interesantes entre ellos, de forma que las impresiones visuales presentes (fotogramas de la derecha de cada tira de película) de algunos momentos del observador coinciden bastante con recuerdos recientes (fotogramas centrales) de otros, mientras que hay casos en que recuerdos recientes coinciden mucho con otros recuerdos más lejanos (fotogramas de la izquierda). Esto define de manera unívoca dos secuencias temporales distintas conformadas por momentos del observador, los que corresponden a las columnas de fotogramas izquierda y derecha, de manera que los tiempos posteriores corresponden a posiciones más altas en la figura.

Consideremos todos los momentos del observador en todo el espaciotiempo. Los que podemos calificar con naturalidad como *percepciones futuras* son los contiguos al momento actual del observador, los cuales encajan con él como lo hacen las piezas de un rompecabezas. En concreto, deberían concordar con los recuerdos que el observador ya tiene, y en el orden correcto (con algunas concesiones comprensibles a omisiones y distorsiones meinorísticas), y con los recuerdos adicionales que se vayan añadiendo a la secuencia. Supongamos, por ejemplo, que es usted el buceador que acaba de ver que una tortuga gigante se acerca nadando hacia la derecha (figura 11.6, columna de la izquierda, segundo momento del observador empezando por arriba) y que quiere predecir su futuro. Como experimento mental, imaginemos también que tiene usted una inteligencia infinita y que ha calculado la estructura matemática de nuestro universo, incluidos todos los momentos del observador y la percepción subjetiva de los mismos. Entonces repara usted en que el único que encaja con su momento actual del observador y que corresponde al segundo temporal siguiente es el momento del observador situado en la izquierda superior de la figura. Así que predice que será eso lo que percibirá dentro de un segundo: en un segundo verá que la tortuga gigante se gira y empieza a nadar hacia usted. De este modo, recupera la noción científica tradicional de causalidad: la posibilidad de predecir el futuro a partir del presente.

¿Dónde estamos? (¿Y qué percibimos?)

Acabamos de ver que la realidad física puede ser una estructura matemática, la cual incluye el espacio, el tiempo, la materia y hasta a nosotros mismos. También hemos visto que, al menos en principio, podríamos predecir nuestro futuro analizando momentos del observador y haciéndolos encajar como las piezas de un puzle. Para efectuar predicciones en la práctica, este procedimiento basado en el momento del observador suele reducirse a la aplicación de la física convencional. Supongamos, por ejemplo, que usted realiza el experimento ilustrado en la figura 10.2, donde se lanza una pelota de baloncesto al aire y se analiza su movimiento. Si se admite que (1) las ecuaciones de la gravitación de Einstein describen ese movimiento, y que (2) no existe ninguna otra persona con las mismísimas percepciones subjetivas que usted, con los mismísimos recuerdos vitales que usted, entonces usted sabe que los únicos momentos del observador futuros que encajan a la perfección con su momento del observador presente son esos en los que se ve que la pelota sigue una trayectoria parabólica como en la figura, así que eso es lo que usted predice que percibirá. ¿Cómo sabía usted que trazaría una parábola y no cualquier otra figura, como una espiral? Pues resolviendo las ecuaciones de Einstein y obteniendo como solución una parábola.

Predecir el futuro: revisión

Sin embargo, ya hemos visto que la segunda afirmación podría ser falsa: si existiera el multiverso del nivel I, o el del nivel III, habría otras personas con idénticas percepciones subjetivas que usted, y entonces el problema de la predicción del futuro ¡se torna mucho más interesante! Elegí poner en plural el título «¿Dónde estamos? (¿Y qué percibimos?)» con cierta picardía, porque planteo esa pregunta también en el caso de que nos interpretemos en plural. Como veremos, la cosa se complica especialmente cuando la cantidad de *ustedes* aumenta o disminuye.

Prosigamos con aquel experimento mental en el que usted conocía cada detalle de la estructura matemática en la que residimos. En tal caso, la predicción de su futuro se reduce a tres pasos:

1. Encontrar todas las entidades conscientes de sí mismas que hay en él.
2. Calcular sus percepciones subjetivas, de forma que usted sepa cuáles podrían ser usted, y qué percibirán en el futuro.

3. Predecir qué percepciones subjetivas tendrá usted en el futuro (probabilidades de las distintas opciones).

Curiosamente, tal como veremos a continuación, ¡cada uno de esos tres pasos conlleva problemas sobrecogedores aún sin solución!

Cómo encontrar entidades conscientes de sí mismas

Empecemos por el primer paso. Partiendo de una estructura matemática dada, que será nuestra realidad física exterior y que tal vez incluya un multiverso, ¿cómo encontrar dentro de ella entidades conscientes de sí mismas? Hemos comentado que los humanos nos correspondemos con determinados patrones de trenza dentro del espaciotiempo. Sin embargo, no quisiera limitar este análisis de la autoconsciencia a las formas de vida que encarnamos los humanos, de modo que usaremos la expresión más general de subestructura autoconsciente (o «SAC» para abreviar) para referirnos a cualquier parte de una estructura matemática que tenga percepciones subjetivas. También emplearemos el término *observador* como sinónimo de vez en cuando, pero mantendremos el vocablo *SAC* siempre que debamos recordar que huimos del antropocentrismo.

Entonces ¿cómo encontrar SAC dentro de una estructura matemática? Está claro que la respuesta inmediata es que aún no lo sabemos. Sencillamente, la ciencia no ha avanzado hasta ese punto. Ni siquiera podemos responder esta pregunta en el caso particular que nos es más familiar: nuestro propio espaciotiempo. En primer lugar, desconocemos en qué estructura matemática residimos, porque la carencia de un modelo autoconsistente de gravitación cuántica salta a la vista. En segundo lugar, aunque conociéramos nuestra estructura matemática, no sabríamos qué hacer con ella para encontrar sus SAC.

Imagine que un alienígena afable que pasara por aquí de visita le proporciona un «detector de SAC», un práctico instrumento portátil parecido a un detector de metales que emitiera un pitido intenso cuando localizara una SAC. Usted juguetea un poco con él y descubre que emite un pitido suave cuando se orienta hacia una carpa, otro más fuerte cuando apunta con él hacia un gato, y que el ruido perfora los tímpanos cuando lo dirige hacia usted, pero que permanece mudo cuando lo acerca a un pepino, a un coche o a un cadáver. ¿Cómo funcionaría un detector así?

Aunque las instrucciones minimalistas que venían con el aparato tan solo hablan de un «algoritmo patentado», yo creo que parte de lo que hace es

medir tanto la complejidad como el contenido de información del objeto que analiza. La *complejidad* de algo suele definirse como la cantidad mínima de bits necesaria para describirlo por completo (un bit es un cero o un uno). Por ejemplo, un diamante descriptible como un conjunto de 10^{24} átomos de carbono cuya disposición sigue un patrón de malla perfectamente regular, tiene una complejidad muy baja comparado con un disco duro de un terabyte de números aleatorios, ya que este último no se puede describir con menos de un terabyte (8×10^{12} bits) de información. Sin embargo, ese disco duro es mucho menos complejo que el cerebro humano, el cual exige más de 100 000 billones (10^{17}) de bits de información tan solo para describir el estado de las sinapsis.

Sin embargo, un disco duro no tendría consciencia de sí mismo por muy grande que fuera, de modo que está claro que la complejidad por sí sola no basta para tener SAC. Sospecho que otra de las cantidades que mediría el detector alienígena es el *contenido de información* del objeto analizado. En matemáticas y en física existen rigurosas definiciones matemáticas de *contenido de información* que se remontan al trabajo desarrollado por Claude Shannon y John von Neumann hace más de medio siglo. Si la complejidad de un objeto mide lo complicado que resulta describirlo, el contenido de información**[69]** cuantífica en qué medida describe ese objeto el resto del mundo. En otras palabras, la información es una medida de cuánto *significado* tiene la complejidad. Si se llena un disco duro de números al azar, no contiene ninguna información sobre el mundo exterior, pero si se llena de libros de historia o de vídeos familiares, entonces sí la contendrá. El cerebro humano porta una cantidad inmensa de información sobre el mundo exterior, tanto en forma de recuerdos de tiempos y lugares lejanos, como en forma de actualización constante del modelo de lo que está ocurriendo a nuestro alrededor en este preciso momento. Cuando una persona muere, el contenido de información de los patrones de descargas eléctricas de las neuronas se desvanece en cuanto se apaga el conjunto del sistema eléctrico y, poco después, el contenido de información almacenado química y biológicamente en las sinapsis también empieza a desaparecer.

No obstante, la complejidad y el contenido de información aún no son suficientes para garantizar la autoconsciencia; por ejemplo, una cámara de vídeo cuenta con ambas cosas, y no tiene consciencia de sí misma en ningún sentido significativo. Esto indica que el detector de SAC debe buscar ingredientes adicionales de autoconsciencia que resultan más difíciles de comprender. Por ejemplo, la figura 11.7 sugiere que una SAC debe ser capaz

no solo de almacenar información, sino también de procesarla en alguna forma de computación, y que tal vez se precise un alto grado de interconexión durante el procesamiento de información. El neurocientífico Giulio Tononi ha lanzado una propuesta fascinante para cuantificar la interconexión necesaria que describe en las publicaciones de Koch y Tononi que figuran en el apartado «Lecturas adicionales recomendadas». La idea central es que para que un sistema de procesamiento de información sea consciente, debe estar integrado en un todo unificado que no se pueda descomponer en partes casi independientes[70]. Esto significa que todas las partes tienen que participar de manera conjunta en la computación, de tal modo que cada parte cuente con gran cantidad de información disponible acerca de las demás. En caso contrario habría más de una consciencia independiente, como en una habitación llena de gente o, tal vez, en las dos mitades del cerebro de un paciente con la conexión del cuerpo calloso seccionada. Si hay partes completamente independientes demasiado simples, entonces no tendrán ninguna consciencia en absoluto, igual que cada uno de los píxeles de una cámara de vídeo.

Generaciones de físicos y químicos han estudiado qué sucede al agrupar cantidades ingentes de átomos, y han descubierto que su comportamiento colectivo depende del patrón en el que están organizados: la diferencia principal entre un sólido, un líquido y un gas no radica en los tipos de átomos, sino en su disposición. Creo que algún día interpretaremos la consciencia como otro estado de la materia. Creo que descubriremos muchos tipos de consciencia, igual que hay muchas clases de líquidos, aunque ambos casos compartirán ciertos rasgos característicos que podemos aspirar a conocer.

¿Qué rasgos tiene un bebé a medida que avanza hacia la consciencia? Consideremos en primer lugar la *memoria*. Para que una sustancia almacene información de manera útil es evidente que necesita contar con un gran repertorio de posibles estados de larga duración. Los sólidos cumplen este requisito, pero los líquidos y los gases, no: si se graba el nombre de alguien en un anillo de oro, la información seguirá en él años más tarde, pero si se graba en la superficie de un estanque, desaparecerá en cuestión de un segundo en cuanto el agua cambie de forma. Otro rasgo deseable de una sustancia memorística es no solo que se lea bien (como un anillo de oro), sino también que registre la información con facilidad: la alteración del estado de un disco duro o de las sinapsis del cerebro requiere menos energía que grabar oro.

¿Qué características atribuiríamos al *computronio*, la sustancia más general capaz de procesar información como una computadora? En lugar de

ser inmóvil, como un anillo de oro, debería manifestar una dinámica compleja para que su estado futuro dependa de algún modo complejo (y, esperemos, que controlable/programable) del estado actual. La disposición de los átomos debería ser menos ordenada que la de un sólido rígido, donde no se produce ningún cambio interesante, pero más ordenada que la de un líquido o un gas. A un nivel microscópico, no es necesario que el computronio exhiba una gran complejidad, porque los expertos en ciencias de la computación han revelado que mientras un dispositivo efectúe ciertas operaciones lógicas básicas, será *universal,* se puede programar para ejecutar la misma computación que cualquier otra computadora siempre que disponga de suficiente tiempo y memoria.

¿Y qué hay del *perceptronio*, la sustancia más general capaz de percibir autoconsciencia subjetiva? Si Tononi está en lo cierto, no solo debería tener las mismas características que el computronio, sino también la propiedad de contar con una información indivisible que conforme un todo unificado. Así, si el detector de SAC analizara una estancia repleta de átomos, primero descifraría cuáles mantienen una intensa conexión con otros, y clasificaría los grupos de átomos conectados entre sí como objetos, por ejemplo, un banco con dos personas sentadas en él. Después identificaría partes de esos objetos que reúnan las características del computronio: por ejemplo, dos cerebros y dos CPU de teléfonos móviles. Por último, concluirá que solo hay perceptronio en los dos cerebros, y que estos son dos piezas independientes, sin conexión entre ellas, cada una correspondiente a la consciencia de cada persona.

Cómo computar la realidad interior: ¿Qué nos ha enseñado la historia?

Una vez localizada una entidad autoconsciente con el detector de SAC, el siguiente paso consiste en calcular sus percepciones subjetivas. Expresado en los mismos términos que empleamos en el capítulo 9, aspiramos a computar su realidad interior a partir de la realidad exterior. Esto plantea un serio desafío en el que apenas tenemos experiencia, puesto que a lo largo de la historia la física ha tendido a centrarse en el problema opuesto: a partir de nuestras percepciones subjetivas hemos buscado ecuaciones matemáticas que las describieran. Por ejemplo, Newton observó el movimiento de la Luna y dedujo la ley de la gravitación que lo explicaba. No obstante, tengo la sensación de que la historia de la física nos ha enseñado muchas lecciones

valiosas sobre la relación que existe entre la realidad interior y la exterior: he aquí siete ejemplos.

No nos angustiemos

Aunque el problema no esté resuelto y sea muy difícil, ya vimos en el capítulo 9 que cabe la posibilidad de dividirlo en dos partes: los físicos podemos limitarnos a partir de la realidad exterior para predecir la realidad consensuada por todos los observadores razonables, y podemos dejar el tema de la realidad interior a la neurociencia y la psicología. Como veremos, para la mayoría de las cuestiones espinosas relacionadas con la predicción del futuro que encontraremos más adelante, será irrelevante la distinción entre la realidad consensuada y la realidad interior. Es más, la historia de la física ha aportado fructíferos casos prácticos, como la mecánica clásica, la relatividad general y la mecánica cuántica, en los que conocemos tanto las ecuaciones clave como lo que se siente al estar gobernados por ellas.

Percibimos lo estable

Los humanos renovamos el grueso de nuestro «hardware» (por ejemplo, las células) y del «software» (como los recuerdos) muchas veces a lo largo de la vida. Aun así, nos percibimos estables y permanentes. Del mismo modo, también percibimos permanentes los objetos distintos a nosotros mismos. O más bien, lo que percibimos como objetos son esos aspectos del mundo que exhiben cierta permanencia. Por ejemplo, cuando observamos el océano, percibimos como objetos las olas en movimiento, porque manifiestan cierta permanencia, aunque la realidad subyacente no sea otro objeto más que el agua siguiendo un movimiento de vaivén. De manera semejante, tal como vimos en el capítulo 8, solo captamos esos aspectos del mundo que son lo bastante estables frente a la decoherencia cuántica.

Nos percibimos locales

Tanto la relatividad como la mecánica cuántica indican que nos percibimos como entes «locales», aunque no lo seamos. En la realidad exterior de la relatividad general usted es un patrón alargado en forma de trenza, pero cada cual se percibe a sí mismo como un ente localizado en un lugar y un tiempo concretos, dentro de un mundo tridimensional donde pasan cosas. Tal como comentamos con anterioridad, las percepciones básicas son los momentos del

observador, y cada uno de ellos se corresponde con una parte concreta y localizada del patrón trenzado de cada cual, no con el todo, la vida entera.

La mecánica cuántica nos enseña la misma lección: si usted incurre en una superposición cuántica en la que esté en dos lugares diferentes al mismo tiempo dentro de la realidad exterior (el espacio matemático de Hilbert donde rige la ecuación de Schrödinger), entonces, tal como vimos en el capítulo 8, ambas copias de usted percibirán una realidad interior en la que ocupan una única ubicación bien definida.

Nos percibimos únicos

En el capítulo 8 también vimos que nos percibimos como sistemas únicos y aislados, aunque no lo seamos. Vimos que aunque la mecánica cuántica nos clonara en la práctica de manera que acabáramos en varios lugares macroscópicos diferentes al mismo tiempo, con un intrincado entrelazamiento con otros sistemas, seguiríamos percibiéndonos como únicos y aislados y conservaríamos una identidad independiente y distinta. Lo que en la realidad exterior parece una «ramificación del observador» se percibe tan solo como una leve aleatoriedad en la realidad interior.

Lo mismo sucede con la clonación clásica, como en la figura 8.3: la clonación determinista se percibe como unicidad acompañada de aleatoriedad. En otras palabras, esa identidad única y localmente bien definida existe tan solo en nuestra realidad interior; a un nivel fundamental es mera ilusión.

Nos percibimos inmortales (¿?)

En el capítulo 8 también barajamos la posibilidad de que los multiversos del nivel I y/o del nivel III nos hicieran sentir inmortales. En resumen, la relación entre las realidades interior y exterior es bastante sutil cuando aumenta o disminuye el número de copias de cada cual:

- *Cuando aumenta el número de copias de usted, entonces usted percibe aleatoriedad subjetiva.*
- *Cuando disminuye el número de copias de usted, entonces usted percibe inmortalidad subjetiva.*

Esta última deducción resulta especialmente controvertida, y su validez o no quizá dependa de la resolución del denominado problema de la medida que describiremos más adelante.

Percibimos lo útil

¿Por qué percibimos el mundo como algo estable y a nosotros mismos como locales y únicos? Esta es mi conjetura: porque es útil. Parece que los humanos hemos desarrollado la consciencia de nosotros mismos a lo largo de la evolución en primer lugar porque ciertos aspectos de nuestro mundo son un tanto predecibles, así que si se sabe construir modelos del mundo, formular predicciones y tomar decisiones inteligentes, se consigue un éxito reproductivo mayor. Por tanto, la autoconsciencia sería un efecto secundario de ese procesamiento avanzado de información. Más en general, es posible que cualquier SAC evolucionado o fabricado con un propósito tenga la autoconsciencia como un subproducto del hecho de contar con un modelo interior tanto del mundo como de sí mismo.

Por tanto, es bastante natural que la SAC perciba tan solo aquellos aspectos de la realidad exterior que le resulten útiles para la consecución de sus objetivos. Por ejemplo, algunas aves migratorias perciben el campo magnético de la Tierra porque es útil para la navegación, mientras que los topos son ciegos a la luz porque la percepción visual no es provechosa para sus hábitos de vida subterráneos. Aunque lo útil y, por tanto, lo percibido, varíe de unas especies a otras, todas las formas de vida parecen compartir ciertas consideraciones básicas. Por ejemplo, solo es beneficioso percibir aspectos del mundo que exhiban suficiente estabilidad y regularidad como para que la información relacionada con ellos facilite predecir el futuro. Si al contemplar un océano agitado por la tormenta usted captara todos los movimientos exactos de los billones de moléculas de agua, le resultaría bastante inútil porque no paran de chocar entre sí y cambiar de dirección en menos de una billonésima de segundo. Sin embargo, notar que una ola inmensa avanza hacia usted es bastante práctico porque le permitirá predecir su desplazamiento futuro con varios segundos de antelación y usar esa predicción para evitar desaparecer del acervo génico.

Del mismo modo, a una SAC le resulta de utilidad sentirse localizada y única, porque la información solo se puede procesar localmente. Aunque exista una copia exacta de usted a un gúgolplex de metros de distancia, o en una decoherencia del espacio cuántico de Hilbert, no podrá darse ninguna transferencia de información entre ambos, de modo que cada uno de los dos «ustedes» tal vez simplifique las cosas y actúe como si la otra copia no existiera.

Percibimos aquello que requiere tener auto consciencia

Como las partes del cerebro humano que reproducen el mundo y el lugar que ocupamos en él (y generan la consciencia) son muy útiles y muy demandadas, su uso se reserva sobre todo a los cálculos/decisiones que verdaderamente las requieren. Igual que usted no recurriría a una supercomputadora para usar un procesador de textos, el cerebro no emplea el módulo de la consciencia para ejecutar tareas mundanas, como regular los latidos del corazón, sino que las externaliza a otras regiones del cerebro de cuya actividad no somos conscientes. Esto sugiere que si un robot futuro tomara consciencia de sí mismo, tal vez seguiría siendo ajeno a las tareas rutinarias autónomas que no requieran el acceso a su modelo de la realidad (por ejemplo, la multiplicación de números). La estructura de la consciencia concebida por Giulio Tononi explica cómo puede funcionar esa externalización cognitiva inconsciente.

Para las personas considero interesante que las defensas corporales contra enemigos microscópicos (el complejísimo sistema inmunitario humano) no parezcan tener consciencia de sí mismas, aunque sí lo sean nuestras defensas contra enemigos macroscópicos (el cerebro controla diversos músculos). Se cree que esto es debido a que los aspectos del mundo relevantes para el primer caso difieren tanto (por ejemplo, escalas de longitud más cortas, escalas temporales más largas) de los relevantes para el segundo, que no se necesita el pensamiento sofisticado y lógico, ni la autoconsciencia que conlleva.

¿Cuándo estamos?

Con anterioridad hemos comentado que una estructura matemática puede contener momentos del observador autoconscientes, como el que está teniendo usted en este instante, y analizamos los desafíos que entraña la localización de esos momentos del observador y el cálculo de cómo es su percepción subjetiva. Existimos dentro de una estructura matemática que contiene alguna clase de espaciotiempo, de modo que para efectuar predicciones físicas deberíamos aspirar a conocer en qué suerte de estructura matemática estamos, y qué lugar ocupa dentro de ella el momento actual del observador: en qué lugar del espacio y en qué momento del tiempo estamos. Como veremos, el «cuándo» es incluso más sutil que el «dónde», sobre todo si la cantidad de copias de usted varía con el tiempo.

Más allá de los dos pasos de Popper

Para mí el conjunto de la ciencia consiste en desentrañar la realidad y el lugar que ocupamos en ella. Desde una perspectiva pragmática, se trata de construir un modelo de la realidad que permita predecir el futuro lo mejor posible, con la finalidad de que decidamos hacer lo que, según la predicción, arroje el mejor resultado. Sospecho que hemos tenido la gran suerte de desarrollar la autoconsciencia justamente para favorecer la consecución de este objetivo. Pensadores de todos los tiempos han intentado precisar en qué consiste este proceso científico, y creo que la mayor parte de los científicos contemporáneos coincide en que se reduce a lo siguiente:

1. Efectuar predicciones a partir de suposiciones.
2. Comparar las observaciones con las predicciones, y actualizar las suposiciones.
3. Repetir.

Los científicos solemos llamar *teoría* a un conjunto de supuestos. En el contexto de la hipótesis del universo matemático, los supuestos determinantes relacionados con el modelo de realidad son en qué estructura matemática vivimos y qué momento del observador particular de ella estamos experimentando ahora mismo. Karl Popper hizo hincapié en el segundo punto de la lista, afirmando que las suposiciones que no generan predicciones comprobables no son científicas. Aunque puso un énfasis especial en la falsabilidad, es decir, que exista, al menos en principio, la posibilidad de comprobar si una suposición científica es falsa, hay una maravillosa herramienta matemática que se conoce como teoría bayesiana de la decisión que generaliza la dicotomía verdadero/falso para admitir matices de grises: a cada posible suposición se le asigna un número entre el cero y el uno, la probabilidad con la que creemos que es correcta, y luego se aplica una fórmula simple para actualizar esas probabilidades cada vez que se realicen más observaciones.

A pesar de su elegancia y de su aceptación, hay un problema con esta aproximación a la ciencia: requiere dos pasos, *dos* momentos del observador conectados. En el primero se efectúa la predicción, y en el segundo se considera lo observado. Esto funciona bien en la situación convencional en la que hay, hubo y siempre habrá como mucho una copia de usted (figura 11.8, izquierda), pero se viene abajo en cualquier escenario de universos paralelos donde haya varios *alter ego*. Como vimos en los capítulos 6 y 8, esta

circunstancia puede producir efectos nuevos, como la inmortalidad subjetiva y la aleatoriedad subjetiva (figura 11.8).

En el contexto de la hipótesis del universo matemático, hemos sostenido que la percepción del flujo del tiempo y que los supuestos y observaciones efectuados existen en cada momento *individual* del observador que experimentamos. Esto significa que debemos superar el planteamiento de los dos pasos de Popper con un planteamiento de un solo momento aplicable a un único momento del observador. Me gusta imaginar que tengo ese formidable control remoto de bolsillo para la propia realidad. Cuando estoy en una reunión aburrida aprieto el botón para que avance deprisa. Cuando experimento algo divertido, rebobino y lo revivo tantas veces como quiero. Y para superar a Popper me limito a apretar el botón de pausa. Eso me permite, al estilo de Horacio, capturar el momento, atraparlo, asimilarlo y reflexionar sobre él sin sentir que me precipito hacia el futuro. En particular, puedo reflexionar sobre lo que supongo y lo que observo. Si el cerebro me funciona como es debido, descubriré que el modelo interior de realidad concuerda bien con las últimas novedades de las que me informan los sentidos sobre el mundo exterior. Y si tengo un buen algoritmo para el razonamiento científico, descubriré que las predicciones que recuerdo que hice para este momento coinciden de manera aceptable con lo que de verdad está ocurriendo. Mientras los sentidos se afanan por registrar información nueva para que la perciba de manera consciente en momentos del observador futuros, la parte consciente de la mente se dedica a usar el algoritmo del razonamiento científico para actualizar las predicciones que hago sobre aspectos más sutiles y abstractos de la realidad.

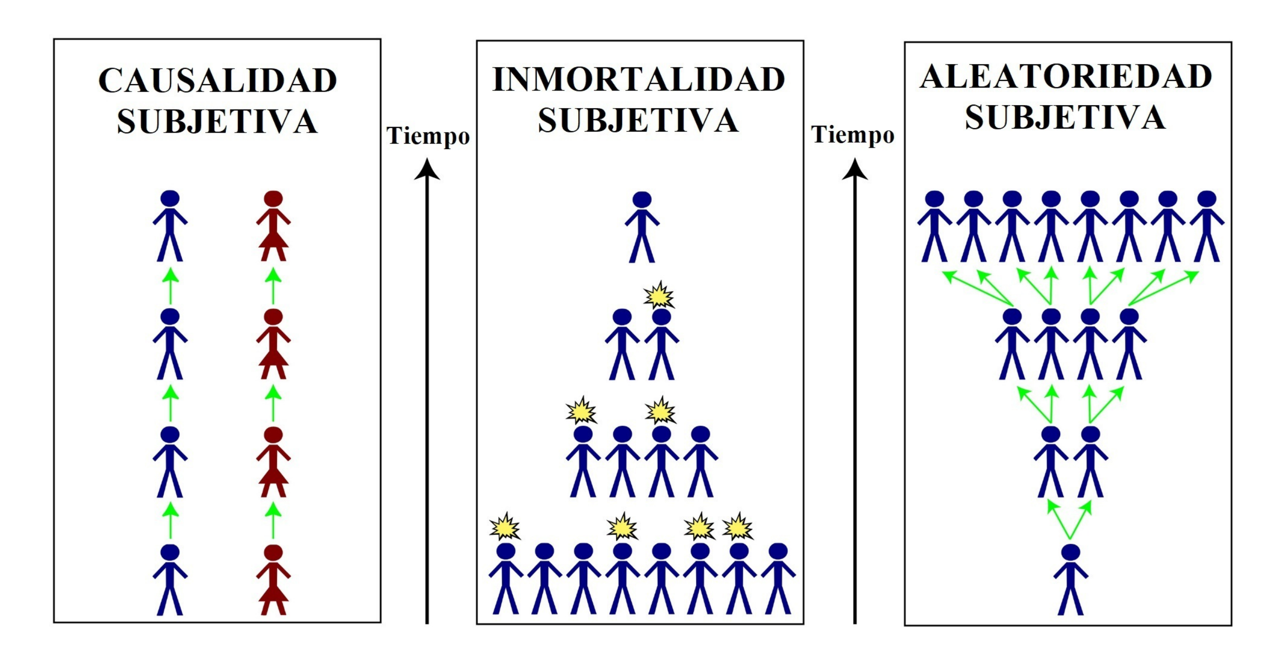


Figura 11.8: Cuando cada momento del observador solo está conectado con uno anterior y otro posterior, percibimos causalidad subjetiva (izquierda). Si desaparecen algunos *alter ego* posteriores, pero no todos, quizá se perciba inmortalidad subjetiva. Si varios *alter ego* posteriores distinguibles de manera subjetiva comparten el mismo *alter ego* anterior, percibimos aleatoriedad subjetiva.

¿Por qué no es usted una hormiga?

Entonces, ¿cómo debería usted razonar en ese momento del observador después de pulsar el botón de pausa? Le hará falta una buena estructura no ya para defenderse en un multiverso, sino también, como veremos, para darle sentido al llamado *argumento del día del juicio final* y otros enigmas filosóficos bien conocidos. Si usted cree en la hipótesis del universo matemático, debería procurar calcular en qué estructura matemática reside. Si esa estructura contiene muchos momentos del observador que subjetivamente parecen suyos, entonces hay la misma probabilidad de que usted corresponda realmente a cualquiera de ellos. A menos que haya algo en las matemáticas que de algún modo rompa la simetría y favorezca a unos frente a otros, tiene las mismas probabilidades de ser cualquiera de ellos. Por tanto, tal como defendí en mi artículo de 1996 sobre el universo matemático, llegamos a la siguiente conclusión:

> *Usted debería razonar como si su momento del observador fuera uno al azar entre todos los que podrían corresponderle.*

A lo largo de las dos últimas décadas hemos asistido a un debate filosófico encendido y fascinante sobre diversas maneras alternativas de razonar, desencadenado en parte por el argumento del día del juicio final (que abordaremos en breve) y otros misterios relacionados. Viene de lejos la idea esencial de que lo esperable sería encontrar nuestra consciencia, no en un *lugar* aleatorio (según el principio copernicano), sino en un *observador* aleatorio; en el capítulo 6 vimos que Brandon Carter la formuló como principio antrópico débil, y Aleks Vilenkin, aparecido en el capítulo 5, la asimiló como el *principio de mediocridad*. Los filósofos contemporáneos Nick Bostrom, Paul Almond y Milan Cirkovic la han estudiado con profusión, y en 2002 Bostrom acuñó la terminología que se ha generalizado en la actualidad del *supuesto de automuestreo fuerte*.

> **Supuesto del automuestreo fuerte (SAMF):** *Cada momento del observador debería razonar como si hubiera sido seleccionado al azar a*

partir de todos los momentos del observador que hay en su clase de referencia.

En este caso la sutileza está en cómo interpretar la expresión *clase de referencia*, y los filósofos que aceptan el SAMF discuten a menudo sobre ello. Si empleamos la opción más restrictiva y limitamos la clase de referencia a momentos del observador de otras copias de usted que se sienten subjetivamente indistinguibles de usted, regresamos al planteamiento que propuse hace tiempo. Sin embargo, veremos que a menudo podemos llegar a otras conclusiones interesantes siendo más liberales: usted seguirá llegando a conclusiones correctas incluso si admite momentos del observador distinguibles entre sí, siempre y cuando el modo en que difieran subjetivamente no afecte a la respuesta que se busca. Para hacerse una idea de cómo funciona esto, consideremos un ejemplo del SAMF en acción, el enigma de la Bella Durmiente de Nick Bostrom:

> *La Bella Durmiente se ofrece voluntaria para protagonizar el siguiente experimento, y se la informa de todos estos detalles. El domingo la mandan a dormir. Se lanza una moneda equilibrada al aire. Si sale cara, la despiertan y la interrogan solo el lunes. Si sale cruz, la despiertan y la interrogan el lunes y el martes, pero cuando vuelvan a mandarla a dormir el lunes, le darán una dosis de un fármaco que provoca amnesia y que garantiza que no recordará el despertar anterior. Siempre que despierten e interroguen a la Bella Durmiente le preguntarán «¿qué probabilidad dirías que hay de que haya salido cara al lanzar la moneda?».*

Tras gran cantidad de publicaciones sobre el tema, la comunidad de filósofos se encuentra ahora dividida entre quienes creen que la muchacha le asignaría la mitad de las probabilidades y quienes creen que le atribuiría un tercio. En el marco de la hipótesis del universo matemático no existe nada que se parezca a la aleatoriedad verdadera, así que podemos sustituir la moneda por una medición cuántica que dé lugar a ambos resultados por igual en dos universos paralelos del nivel III. Ahora hay tres momentos del observador subjetivamente indistinguibles en la estructura matemática que se corresponden con el momento en que interrogan a la muchacha y todos ellos son igual de reales:

1. Sale cara y es lunes.
2. Sale cruz y es lunes.
3. Sale cruz y es martes.

Como solo uno de los tres momentos se corresponde con la opción de que salga cara, le atribuirá una probabilidad de 1/3 y experimentará la correspondiente aleatoriedad subjetiva una vez que lo descubra.

Supongamos ahora que quienes ejecutan el experimento deciden en secreto pintarle las uñas de un color determinado dependiendo del resultado de la medición cuántica. Esto conllevará que no todos los momentos del observador sean indistinguibles, pero como ella desconoce el código de color, su evaluación de las probabilidades no variará. En otras palabras, somos libres de ampliar la clase de referencia siempre y cuando no influya en el resultado.

Esta conclusión tiene unas implicaciones extremas: sugiere que por muy vasto y descabellado que pueda ser un multiverso existente ahí fuera, ¡lo más probable es que los humanos seamos *muy normales* comparados con todos los observadores que se plantean este tipo de preguntas! Por ejemplo, es muy improbable que sistemas solares normales contengan miles de billones de homínidos semejantes a nosotros, porque si así fuera, habría un millón de veces más de probabilidades de que nos encontráramos en un sistema solar tan poblado, en lugar de hallarnos en el nuestro, donde alcanzamos la mísera cifra de 7000 millones de habitantes. En otras palabras, el SAMF permite efectuar afirmaciones sobre lo que ocurre incluso en lugares inobservables para nosotros.

Sin embargo, como todas las herramientas poderosas, el SAMF debe usarse con cautela. Por ejemplo, ¿por qué no es usted una hormiga? Si tomamos como clase de referencia las formas de vida basadas en el carbono de la Tierra, resulta que nuestras amigas de seis patas ascienden a más de 10 000 billones de individuos y nos superan a los bípedos en más de un millón a uno. Por tanto, ¿no implica eso que es un millón de veces más probable que nuestro momento actual del observador sea el de una hormiga y no el de un humano? En tal caso, eso descartaría nuestro esquema básico de realidad con un 99,9999 % de seguridad. De acuerdo, hemos pasado por alto que los humanos vivimos alrededor de 100 veces más que las hormigas, pero eso no cambia la inquietante conclusión.

La solución radica más bien en la elección de la clase de referencia. Tal como ilustra la figura 11.9, tenemos muchas opciones distintas de clase de referencia. La más inclusiva de todas es la que integra todos los momentos del observador de todas las subestructuras autoconscientes, y la más exclusiva es

la que contiene tan solo aquellos momentos del observador que subjetivamente se perciben idénticos al de usted en este preciso instante. Si se pregunta «¿Qué clase de entidad debo esperar ser?», entonces su clase de referencia deberá restringirse claramente a entidades que se planteen ese tipo de cuestiones ¡y las hormigas no lo hacen!

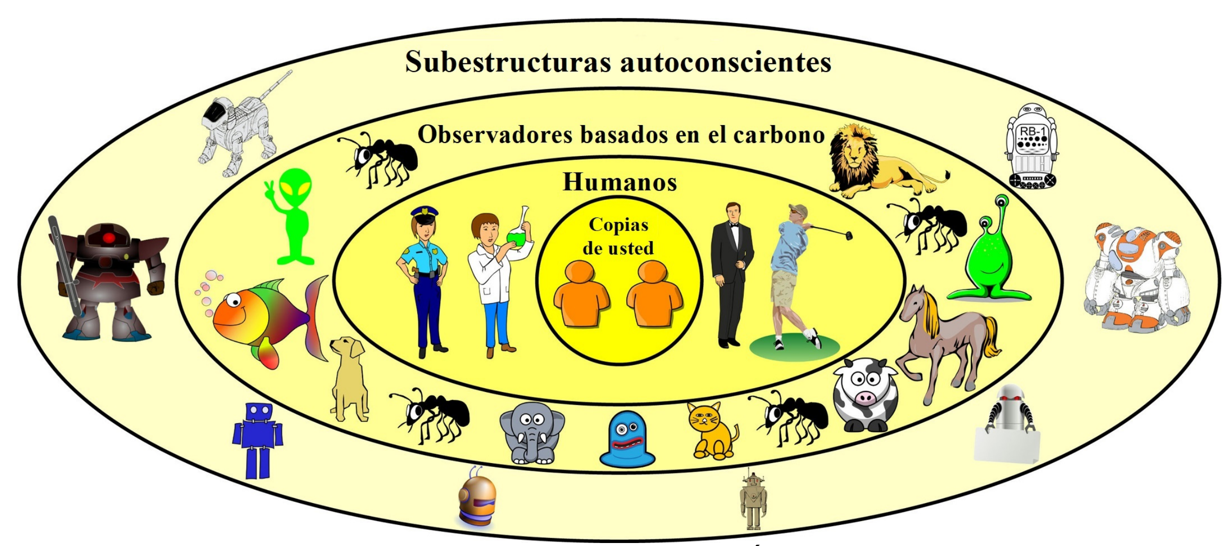


Figura 11.9: *¿Qué probabilidad hay de que [INSERTE AQUÍ SU PREGUNTA FAVORITA] dado que soy un…?* Lo que usted ponga en el espacio entre corchetes será su clase de referencia, ilustrada arriba. En la hipótesis del universo matemático siempre vale razonar como si usted fuera un miembro aleatorio de la clase de referencia más restrictiva, correspondiente a todos los momentos del observador que tienen la misma percepción subjetiva que usted, pero en algunos casos se pueden extraer conclusiones adicionales válidas e interesantes al ampliar la clase de referencia, como incluir a los humanos con otras entidades autoconscientes capaces de plantearse la misma pregunta.

El empleo de la clase de referencia correcta se corresponde con un uso correcto de lo que en estadística se denominan las probabilidades condicionadas, y cualquier negligencia al respecto puede conllevar errores épicos. En 2010, una gran encuesta fracasó al no predecir que el senador estadounidense líder de la mayoría Harry Reid saldría reelegido en Nevada, porque el programa que efectuaba las llamadas automáticas para sondear la intención de voto se colgaba siempre que el receptor de la llamada no hablaba inglés, de modo que obviaba la respuesta de los votantes hispanos simpatizantes de Reid. En el capítulo 6 vimos que cabría esperar que una región normal del espacio resida en un universo con demasiada energía oscura como para formar galaxias, y que lo esperable sería que cualquier átomo de hidrógeno normal de nuestro universo particular se encontrara inmerso en una nube de gas intergaláctica o en una estrella. Sin embargo, esos no son lugares donde debamos esperar hallarnos nosotros porque «todos los puntos» y «todos los átomos» son clases de referencia irrelevantes para los humanos, dado que ni los puntos ni los átomos se plantean preguntas.

¿Por qué no es usted un cerebro de Boltzmann?

Si le suena descabellado que su clase de referencia incluya un alienígena extraterrestre, le divertirá saber que algunos de mis colegas se esfuerzan por incluir en ella miembros aún más exóticos: como simulaciones y cerebros de Boltzmann.

Somos pruebas vivientes de que los átomos se pueden ensamblar siguiendo un patrón complejo que posee la percepción subjetiva de sí mismo. De momento, la investigación en el campo de la física no ha revelado ningún indicio de que el nuestro sea el único camino hacia la consciencia. Por tanto, debemos considerar la posibilidad de que haya otras disposiciones de átomos que también tengan consciencia de sí mismas, y que algunas formas de vida (tal vez incluso nosotros o nuestros descendientes) creen algún día entidades así. Quizá se parezcan a robots inteligentes con auténticos cuerpos físicos capaces de interaccionar con el mundo que los rodea, o tal vez sean simulaciones como los personajes de la holocubierta que aparece en *Star Trek: La nueva generación* o el Agente Smith en *The Matrix*[71], provistos de cuerpos puramente virtuales y cuyas vidas transcurren dentro de la realidad virtual de una computadora superpotente. Algunas de esas simulaciones podrían tener momentos del observador cuya percepción subjetiva fuera idéntica a la que siente usted en este preciso instante.

Si ese fuera el caso, es evidente que debería incluir las simulaciones de su yo dentro de su clase de referencia. Nick Bostrom y otros han escrito mucho sobre este tema y han llegado a la conclusión de que hay una probabilidad razonable de que en realidad seamos una simulación. En el próximo capítulo ofreceré un contraargumento, pero si entretanto desea sentirse seguro, al estilo de la apuesta de Pascal, mi consejo es que usted debería vivir la vida a tope y emprender cosas novedosas e interesantes. Así, en caso de que usted sea una simulación, será menos probable que aburra a quienquiera que la haya creado y, por tanto, también habrá menos probabilidades de que la apague…

Mientras que las simulaciones se crean a propósito, los llamados *cerebros de Boltzmann* surgen por casualidad. Tras iniciar la disciplina conocida como *mecánica estadística* unos ciento cincuenta años atrás, el físico austríaco Ludwig Boltzmann reparó en que si se deja a su aire un objeto caliente durante el tiempo suficiente, surgirán al azar las disposiciones de átomos más improbables. Las partículas tardarán un tiempo extremadamente largo en reorganizarse de manera espontánea en un cerebro autoconsciente, pero si se espera lo bastante, sucederá.

Regresemos ahora al universo actual y consideremos su destino a largo plazo. La expansión acelerada acabará diluyendo toda la materia que ahora llena este universo, pero si la densidad cósmica de la energía oscura permanece constante (tal como sugieren las medidas actuales), entonces emitirá por siempre una cantidad muy ligera de energía calorífica. Este calor proviene del mismo tipo de fluctuaciones cuánticas que generaron las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas del capítulo 5, y es bien sabido que Stephen Hawking descubrió que cuanto más deprisa se expanda el universo, mayor será esta denominada temperatura de Hawking. La energía oscura hace que este universo se expanda mucho más despacio que durante la inflación, de modo que la temperatura que aporta se reduce a una quintillonésima (10^{-30}) de grado por encima del cero absoluto.

Una cantidad bastante reducida, incluso para los estándares suecos, pero no es el cero absoluto, lo que significa que si esperamos lo bastante, esa energía calorífica se reorganizará en lo que queramos. En el modelo cosmológico estándar, esta redistribución aleatoria continúa para *siempre*, de modo que también creará al azar una réplica exacta de usted que tenga las mismas percepciones subjetivas que usted, junto con recuerdos falsos de haber vivido toda su vida. Mucho más a menudo producirá meras réplicas de su cerebro desprovisto de cuerpo que perdurará justo el tiempo suficiente para reproducir su momento del observador actual. Y luego, volverá a hacerlo una cantidad infinita de veces, de manera que por cada copia de usted que haya evolucionado y vivido una vida real, habrá una cantidad infinita de ilusorios cerebros de Boltzmann desprovistos de cuerpo convencidos de haber vivido esa misma vida real.

Esto resulta profundamente desconcertante. Si nuestro espaciotiempo de verdad contiene esos cerebros de Boltzmann, ¡casi hay un 100 % de seguridad de que usted es uno de ellos! Al fin y al cabo, el momento del observador de su yo evolucionado se encuentra en la misma clase de referencia que el de esos otros cerebros, puesto que tienen la misma percepción subjetiva que usted, de modo que usted debería razonar como si usted estuviera en uno de esos momentos del observador aleatorios… y los desprovistos de cuerpo superan en número al cerebro provisto de cuerpo en una proporción de infinito frente a uno…

Antes de que el estado ontológico de su cuerpo le cree demasiadas preocupaciones, he aquí una prueba sencilla para precisar si usted es o no un cerebro de Boltzmann. Pausa. Introspección. Analice los recuerdos. En los cerebros de Boltzmann hay más probabilidad de que cualquier recuerdo

particular sea falso que de que no lo sea. Sin embargo, por cada serie de recuerdos falsos que podrían pasar por reales, resultan muchísimo más probables otros conjuntos de recuerdos muy similares pero que incorporen elementos descabellados insertados al azar (como, por ejemplo, que usted recuerde que la *Quinta Sinfonía* de Beethoven consiste en puro ruido), porque hay muchos más cerebros desprovistos de cuerpo con este tipo de recuerdos. Esto es así porque hay muchas más maneras de que las cosas sean casi exactas, que de que sean exactas. Lo que significa que si de verdad usted fuera un cerebro de Boltzmann que al principio pensara que no lo es, entonces, cuando empezara a repasar la memoria, descubriría cada vez más disparates. Y, después de eso, usted percibirá que su realidad se disuelve a medida que las partículas que lo conforman regresan al espacio frío y casi vacío del que salieron.

En otras palabras, si usted aún está leyendo esto, entonces *no* es un cerebro de Boltzmann. Esto significa que hay algo erróneo en la esencia de la asunción que hicimos sobre el futuro de este universo y que tenemos algo que aprender. En breve exploraremos qué es, dentro del apartado dedicado al «problema de la medida».

El argumento del día del juicio final: ¿está próximo el final?

Ya hemos visto la trascendencia de la idea de que usted debería ser un observador normal, y las sorprendentes consecuencias que implica. Otra consecuencia muy discutida es la del *argumento del día del juicio final*, formulado por primera vez por Brandon Cárter en 1983.

Durante la Segunda Guerra Mundial los Aliados efectuaron una estimación atinada de la cantidad de carros de combate que tenían los alemanes a partir de sus números de serie. Si el primer carro de combate capturado portaba el número de serie 50, entonces se descartaba la hipótesis de que hubiera más de mil carros de combate con un 95 % de fiabilidad, puesto que la probabilidad de capturar uno de los primeros cincuenta que se fabricaron habría sido inferior al 5 %. La suposición clave es que el primer carro de combate capturado se puede interpretar como uno al azar de la clase de referencia de todos los tanques.

Carter señaló que si se asignara a cada ser humano un número de serie al nacer, se podría aplicar un argumento idéntico para calcular la cantidad total de humanos que llegará a haber a lo largo de la historia. Cuando vine al mundo en 1967, fui aproximadamente la persona 50 000 millones, de modo que si soy un humano al azar de entre toda la gente que llegará a existir,

puedo descartar con un 95 % de seguridad la hipótesis de que nacerán más de un billón de humanos en total. En otras palabras, es muy improbable que lleguen a nacer más de un billón de humanos, porque eso me situaría dentro del primer 5 % de los humanos existentes, algo que solo se explicaría con un improbable golpe de suerte. Es más, si la población mundial se estabilizara en 10 000 millones con una esperanza de vida de ochenta años, la humanidad tal como la conocemos ahora se acabaría con un 95 % de seguridad antes del año 10 000 d. de C.

Si creyera que el día del juicio final lo causarán las armas nucleares (o la tecnología informática, la biotecnología o cualquier otra tecnología que existe tan solo desde después de 1945), mi previsión sería más pesimista: desde que empezaron los peligros mi puesto de nacimiento se sitúa en 1600 millones, y puedo descartar con un 95 % de fiabilidad que habrá otros 32 000 millones de nacimientos después de mí, hasta el año 2100. Ese sería el límite de fiabilidad del 95 %, así que una fecha más probable para el fin de la humanidad es justo ahora. Para escapar de esta conclusión tan pesimista, tendría que encontrar alguna razón *a priori* para explicar por qué debería contarme entre el primer 5 % de todos los humanos que nacerán a la sombra de esas tecnologías. En el capítulo 13 regresaremos al riesgo existencial que plantea la tecnología.

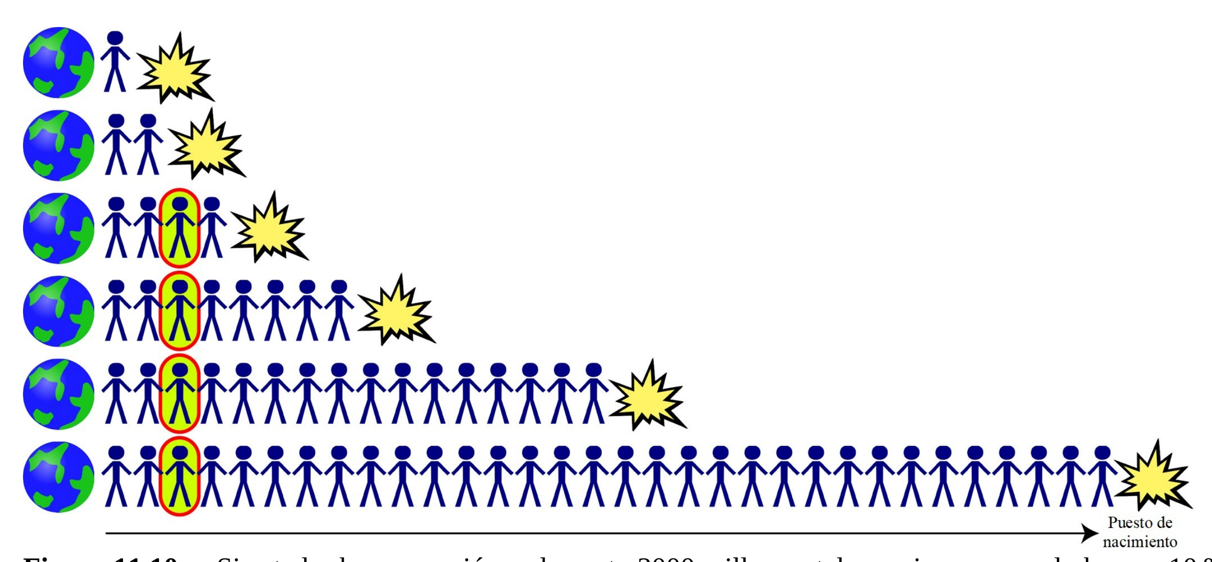


Figura 11.10: Si usted sabe que nació en el puesto 3000 millones, tal vez piense que solo hay un 10 % de posibilidades de que en su planeta lleguen a morar más de 30 000 millones de individuos. Pero supongamos que sabe que hay seis planetas semejantes a este, donde la cantidad total de personas nacidas desde el comienzo hasta el final de sus civilizaciones asciende a 1000, 2000, 4000, 8000, 16 000 y 32 000 millones, respectivamente (cada muñequito representa aquí mil millones de personas). Entonces, la probabilidad de que su planeta albergue un total de más de 30 000 millones de personas asciende en realidad al 25 %; hay exactamente cuatro personas que ocupan su puesto de nacimiento, y usted tiene las mismas probabilidades de ser cualquiera de ellas, y el 25 % de ellas vive en el halagüeño planeta situado en la parte inferior de este esquema.

Alguna gente se toma muy en serio el argumento del día del juicio final. Por ejemplo, cuando tuve el placer de conocer a Brandon Cárter durante un congreso, me habló con entusiasmo sobre los signos más recientes de que la explosión demográfica se está frenando, añadiendo que él había previsto que ocurriría así, y que eso significa que podemos esperar que la humanidad sobreviva durante más tiempo. Otras personas han criticado dicho argumento con razones diversas. Por ejemplo, las cosas se tornarían más sutiles si existieran otros planetas con gente parecida a nosotros. La figura 11.10 ilustra un ejemplo, y en ella se ve que la cantidad total de personas varía mucho de un planeta a otro. Si sabemos que nos encontramos ante este caso, entonces habrá que emitir una previsión más optimista acerca del futuro de lo que sugiere el argumento del día del juicio final. De hecho, si yo creyera en la teoría más extrema de que solo existen dos planetas habitados en el espaciotiempo, y que sostendrán a lo largo de sus historias cantidades totales de individuos iguales a 100 000 millones y 100 000 billones, respectivamente, entonces habrá una probabilidad del 50 % de que ahora me encuentre en el planeta que acabarán disfrutando 1000 billones de personas.

Por desgracia, este contraargumento solo sirve para aportar una falsa esperanza. No dispongo de semejante información, y tengo muy buenas razones para pensar que esta teoría de los dos planetas es falsa: la observación de que mi puesto de nacimiento ronda el número 50 000 millones descarta esa teoría con más de un 99,9999 % de fiabilidad, porque la probabilidad de que una persona al azar se sitúe entre los primeros 50 000 millones de personas nacidas asciende tan solo a 0,00005 %.

¿Por qué es tan vieja la Tierra?

En marzo de 2005 tuve el placer de conocer a Nick Bostrom durante un congreso en California, y enseguida descubrimos que compartimos no solo recuerdos de una infancia en Suecia, sino también la fascinación por las grandes cuestiones. Después de un poco de buen vino, la conversación derivó hacia situaciones del día del juicio final. ¿Era posible que el Gran Colisionador de Hadrones creara un agujero negro en miniatura que acabara engullendo la Tierra? ¿Podría crear un *strangelet* capaz de catalizar la conversión de la Tierra en materia de quarks extraños? Compañeros míos en el MIT cuyos cálculos me infunden confianza han llegado a la conclusión de que existe un riesgo insignificante, pero ¿y si hemos pasado algo por alto? Lo que solía dejarme más tranquilo era que la naturaleza es mucho más violenta que cualquier máquina producida por los humanos: por ejemplo, partículas de

rayos cósmicos creadas en las cercanías de agujeros negros monstruosos chocan a menudo con la Tierra cargadas con una energía más de un millón de veces superior a la que alcanzan a generar nuestros aceleradores, y cuatro mil quinientos millones de años después de formarse, la Tierra sigue sana y salva. Estaba claro, pues, que la Tierra es muy robusta y que no debía preocuparme. Por esta misma razón tampoco debían preocuparme otros escenarios cósmicos del día del juicio final, como la «congelación» del espacio para pasar a otro estado de baja energía, tal como figura en el capítulo 5, donde una burbuja cósmica mortal contiene esta nueva clase de espacio no habitable, se expande a la velocidad de la luz y destruye toda la humanidad a su paso en el mismísimo instante en que la ven llegar: si seguimos aquí después de todo ese tiempo, debe de ser que se trata de sucesos inexistentes o muy raros.

Entonces me asaltó un pensamiento terrible: ¡aquel razonamiento tranquilizador era erróneo! Supongamos que cada planeta tiene un 50 % de posibilidades de ser destruido cada día. Entonces la inmensa mayoría de ellos desaparecerá en cuestión de semanas, pero dentro de un espacio con una cantidad infinita de planetas, siempre habrá un número infinito de ellos que se libre y cuyos habitantes permanezcan felizmente ignorantes del sombrío futuro que les aguarda. Y si yo no soy más que un observador al azar dentro del espaciotiempo, entonces esperaría ser uno de esos cándidos individuos que no se dan cuenta de que son como corderos a punto de ser masacrados. Dicho de otro modo, el hecho de que mi región del espacio aún no haya sido destruida no me dice *nada*, porque *todos* los observadores vivos se encuentran en regiones del espacio que no están destruidas. Aquello me inquietó mucho. Me sentí como si estuviera en un zoo ante una manada de leones hambrientos y acabara de darme cuenta de que la valla que creía que me protegía es una ilusión óptica… que los leones no ven.

Nick y yo nos angustiamos durante un rato, hasta que dimos con un argumento diferente en contra del día del juicio final, y libre de errores. La Tierra se formó unos nueve mil millones de años después de la Gran Explosión, y ahora está bastante claro que la Galaxia (y otras galaxias parecidas de otros lugares) alberga gran cantidad de planetas como la Tierra que se formaron varios miles de millones de años antes. Esto significa que cuando consideramos todos los observadores semejantes a nosotros en todo el espaciotiempo, una fracción significativa de ellos existe desde mucho antes que nosotros. Ahora bien, si los planetas se destruyen al azar con una vida media breve (como un día, un año o un milenio), entonces la mayoría de todos los momentos del observador ocurriría bastante pronto en las historias

planetarias, y es muy improbable que nosotros nos hallemos en un planeta que se formara a un ritmo tan lento y más bien tarde con respecto a los demás. Decidimos escribir un artículo sobre esto, y trabajamos en él hasta altas horas de la noche en el salón de un hotel. Cuando al fin me fui a dormir lo hice sabiendo con un 99,9 % de seguridad que durante otros mil millones de años no nos alcanzarían ni burbujas mortales, ni agujeros negros, ni *strangelets*.

A menos, por supuesto, que los humanos cometamos alguna estupidez que la naturaleza aún no ha probado a realizar…

¿Por qué no es usted más joven?

Como acabamos de ver, si hubiera alguna inestabilidad terrible inherente a la física que hiciera durar poco a los planetas, entonces deberíamos pensar que estamos en uno de los primeros planetas habitables que se han formado, no en este parsimonioso planeta nuestro. De modo que esta deprimente teoría queda descartada. Por desgracia para la inflación, Alan Guth se dio cuenta de que al partir de ciertos supuestos que parecen razonables, ¡esta predice eso mismo! Dolido por el hecho de que su creación prediga una Tierra mucho más joven, llamó a esto la *paradoja de la juventud*. Hacia la época en que empezamos a ser compañeros en el MIT, allá por 2004, dediqué mucho tiempo a pensar cómo efectuar predicciones en un multiverso. Escribí un artículo sobre este tema que batió todos mis récords previos en cuanto a extensión, y me sorprendió descubrir que la paradoja de la juventud era más extrema aún de lo que habíamos pensado.

Tal como vimos en el capítulo 5, la inflación es eterna y dobla el volumen del espacio más o menos cada 10^{-38} segundos, y así crea un espacio tiempo desordenado en el que ocurre una cantidad innumerable de Grandes Explosiones en diferentes momentos y se forma una cantidad innumerable de planetas en diferentes momentos. Vimos que un observador situado en cualquier planeta dado creerá que su Gran Explosión coincide con el instante en que acabó la inflación en su región del espacio; para mí en concreto, el desfase temporal entre mi Gran Explosión y mi momento actual del observador asciende a unos catorce mil millones de años. Consideremos ahora todos los momentos del observador simultáneos: para algunos, el tiempo transcurrido desde su Gran Explosión asciende a trece mil millones de años, para otros será de quince mil millones de años, etc. Como el volumen se dobla a un ritmo frenético, un segundo después ocurrirá una cantidad $2^{10^{38}}$ veces mayor de Grandes Explosiones, porque el volumen se habrá duplicado

10^{38} veces durante ese segundo adicional. De manera parecida, habrá $2^{10^{38}}$ veces más observadores en las galaxias que formen. Esto significa que si yo me hallara en un momento del observador cualquiera de entre todos los que están ocurriendo en este momento, entonces tengo $2^{10^{38}}$ veces más probabilidades de hallarme en un universo un segundo más joven, ¡uno cuya Gran Explosión hubiera sido un segundo más reciente! Eso viene a ser alrededor de un uno seguido de 100 billones de billones de billones de ceros más probable. Mi planeta debería ser más joven, mi cuerpo debería ser más joven y todo debería parecer haberse formado y desarrollado atropelladamente.

Si una parte del espacio experimentó su Gran Explosión en tiempos más recientes, estará más caliente, porque habrá tenido menos tiempo para enfriarse, de modo que sería muy improbable que estuviéramos en un universo más bien frío, y eso nos sitúa ante un *problema de frialdad*: cuando calculé la probabilidad de que la temperatura del fondo cósmico de microondas fuera inferior a tres grados por encima del cero absoluto, obtuve la cifra de $10^{-10^{56}}$, así que cuando el satélite *COBE* midió que dicha temperatura asciende a 2725 kelvin, la medición descartó toda nuestra hipótesis basada en la inflación con un 99,999…999 % de fiabilidad, una cifra que consta de 100 millones de billones de billones de billones de billones de nueves detrás del punto decimal. Nada bueno… Para colmo de la vergüenza por discrepancias entre la teoría y la experimentación, esto tritura incluso el problema de la estabilidad del átomo de hidrógeno del capítulo 7 (con 28 nueves), y el problema de la energía oscura del capítulo 4 (123 nueves). ¡Bienvenidos al *problema de la medida*!

El problema de la medida: la física en crisis

Algo salió fatal, ¿pero qué exactamente? ¿De verdad descarta esto la inflación eterna? Echemos una ojeada más de cerca. Nos hemos planteado una pregunta razonable sobre qué sería de esperar que midiera un observador típico, y elegimos el ejemplo concreto de la temperatura del fondo cósmico de microondas. Como consideramos la inflación eterna, analizamos un espaciotiempo donde muchos momentos del observador midieran muchas temperaturas distintas, de modo que no podíamos predecir una única respuesta, sino tan solo probabilidades para distintos rangos de temperatura. Esto, de por sí, no supone el fin del mundo: vimos en el capítulo 7 que la mecánica cuántica predice tan solo probabilidades, no respuestas definitivas,

y a pesar de ello constituye una teoría científica verificable y eficaz. El problema estriba en que las probabilidades calculadas revelaron que lo observado en la realidad es de una improbabilidad absurda, de modo que la teoría subyacente queda descartada.

¿Podría haber un error en los cálculos de las probabilidades? Las matemáticas son inequívocas en principio: las probabilidades no son más que las fracciones de todos los momentos del observador de nuestra clase de referencia que miden varias temperaturas. Si hubiera solo cinco de esos momentos del observador y midieran 1, 2, 5, 10 y 12 grados por encima del cero absoluto, entonces la fracción que mide menos de tres grados asciende a dos quintos, 2/5 = 40 % ¡Fácil! Pero ¿y si, tal como predice la inflación eterna, hay una cantidad *infinita* de tales momentos del observador, y la fracción de los que miden menos de tres grados es infinito partido por infinito? ¿Qué sentido le daríamos a eso?

Los matemáticos han desarrollado un esquema elegante denominado *cálculo de límites*, que en muchos casos sirve para dar sentido a ∞/∞. Por ejemplo ¿qué fracción de todos los números enteros 1, 2, 3… es par? Existe una cantidad infinita de números y entre ellos hay una cantidad infinita de números pares, de modo que la fracción es ∞/∞. Pero si solo contamos los primeros *n* números, obtenemos una respuesta lógica que depende ligeramente de dónde situemos el límite *n*. Si aumentamos el valor de *n*, veremos que la fracción fluctúa cada vez menos a medida que *n* crece. Si situamos ese límite allí donde *n* se acerca al infinito, entonces obtenemos una respuesta bien definida que no depende en absoluto de *n*: exactamente la mitad de los números son pares.

Esto parece una respuesta razonable, pero los infinitos son traicioneros: la fracción de los números pares ¡dependerá del orden en el que los contemos! Si seguimos el orden 1, 2, 4, 3, 6, 8, 5, 10, 12, 7, 14, 16, etc., entonces ese mismo límite da como respuesta que ¡2/3 de los números son pares! Porque a medida que avanza esa lista de números, nos encontramos con dos números pares por cada número impar. No hemos hecho trampa, porque al final figurarán en la lista todos los números pares e impares, ¡sencillamente los hemos ordenado de otra manera! Del mismo modo, si reordeno los números de la manera adecuada, puedo demostrar que la fracción de los números pares es uno dividido entre mi número de teléfono…

De manera análoga, la fracción de todos los infinitos observadores del espacio tiempo que efectúen una observación determinada ¡dependerá del orden en que se cuenten! Los cosmólogos usamos el término *medida* para

referirnos a un esquema de ordenación de momentos del observador o, más en general, para referirnos a un método para calcular probabilidades a partir de infinitos molestos. Las disparatadas probabilidades que calculé para el problema de la frialdad del universo se correspondían con una medida particular, y la mayoría de mis colegas sospecha que el problema no radica en la inflación, sino en la medida: por alguna razón parece erróneo hablar de clase de referencia para todos los momentos del observador en un instante fijo.

En los últimos años se ha publicado un torrente de artículos interesantes que proponen medidas alternativas. Se ha revelado especialmente difícil encontrar una que funcione con la inflación eterna: algunas medidas fracasan al enfrentarse al problema de la frialdad; otras fallan porque predicen que somos cerebros de Boltzmann, mientras que otras predicen que deberíamos ver el cielo deformado por agujeros negros gigantescos. Aleks Vilenkin me contó hace poco que se estaba desanimando: hace unos años abrigaba esperanzas de que hubiera una medida que salvara todos estos obstáculos, y que fuera tan simple y elegante que nos convenciera del todo. Pero lo que tenemos ahora es un conjunto de distintas medidas que parecen emitir predicciones diferentes, aunque razonables, sin que haya ninguna forma evidente de elegir entre todas ellas. Si las probabilidades que predecimos dependen de la medida empleada, y podemos emplear una medida para obtener casi cualquier respuesta, entonces en realidad no habremos predicho nada en absoluto.

Comparto la preocupación de Aleks. De hecho, considero el problema de la medida como la mayor crisis de la física actual. En mi opinión, la inflación ha sufrido una autodestrucción lógica. Como vimos en el capítulo 5, empezamos tomándonos en serio la inflación por la corrección de sus predicciones: pronosticó que observadores normales medirían que el espacio circundante es plano en lugar de curvo (el problema de la curvatura nula); que medirían que la temperatura de su fondo cósmico de microondas sería similar en todas direcciones (el problema del horizonte); que medirían un potente espectro similar al que detectó el satélite *WMAP*, etc. Pero a continuación predijo que una cantidad infinita de observadores mediría cosas totalmente distintas, y con unas probabilidades que dependen de una medida desconocida. Lo que a su vez significa que, en un sentido estricto, la inflación no predice nada en absoluto sobre lo que deberían ver observadores normales. Han quedado anulados todos los pronósticos, ¡incluidos los que nos animaron a tomarnos la inflación en serio en un primer momento! Autodestrucción

total. Nuestro universo inflacionario en ciernes se ha convertido en un adolescente impredecible.

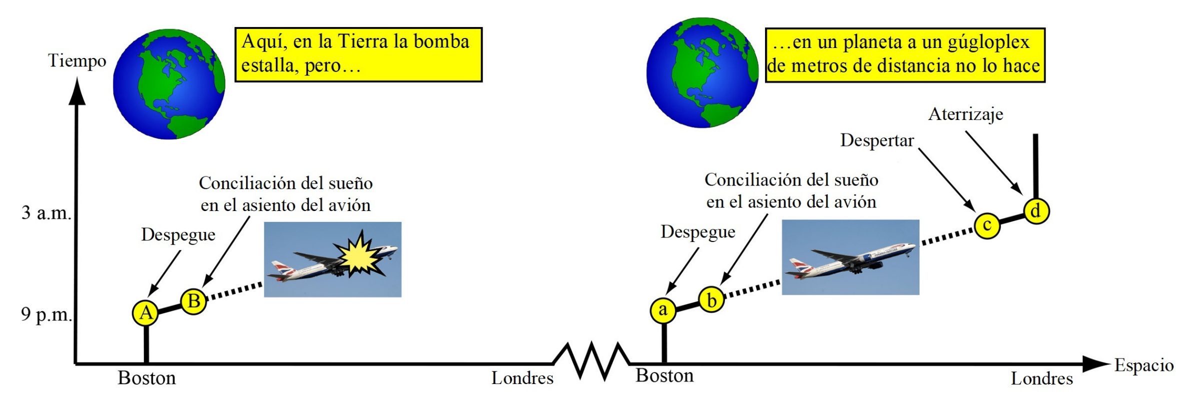


Figura 11.11: En la figura 11.5 vimos que el momento del observador ese percibe como la continuación del momento del observador *b* porque comparte con él todos los recuerdos. Sin embargo, *c* también se percibe como la continuación de *B*, un momento del observador perteneciente a un sosias en un vuelo idéntico con la salvedad de que un atentado terrorista mata a todos los pasajeros antes de que se despierten. Si no hay más sosias, entonces la predicción correcta tanto para *B* como para *b* es que lo siguiente que percibirán será *c*.

Para ser justos con la inflación, creo que no hay ninguna teoría cosmológica en el mercado que compita con ella y que lo haga mejor, de modo que no interpreto esto como un argumento en contra de la inflación en sí. Sencillamente, estoy convencido de que debemos resolver el problema de la medida, y sospecho que una vez resuelto aún quedará alguna forma de inflación. Es más, el problema de la medida no se limita a la inflación, sino que aflora en *cualquier* teoría con una cantidad infinita de observadores. Regresemos a modo de ejemplo a la mecánica cuántica sin colapso. El razonamiento de la inmortalidad cuántica del capítulo 8 depende de manera crucial de que haya una cantidad infinita de observadores, de modo que siempre sobreviva alguno, lo que significa que no podemos confiar en ninguna de las conclusiones hasta haber resuelto el problema de la medida.

Tal como ilustra la figura 11.11, la inmortalidad subjetiva no precisa la mecánica cuántica, le bastan los universos paralelos (es irrelevante si los aviones de la figura están en distintos lugares de nuestro espacio tridimensional (multiverso del nivel I) o en distintos lugares de nuestro espacio de Hilbert (multiverso del nivel III). De modo que, de manera más general, consideraremos cualquier escenario de multiversos donde algún mecanismo aniquile cada segundo la mitad de todas las copias que haya de usted. Después de veinte segundos, tan solo seguirán vivos uno de cada millón (1 de 2^{20}) de *alter ego* suyos que hubiera en un principio. Hasta entonces había momentos del observador con una duración de $2^{20} + 2^{19} + \ldots + 4 + 2 + 1 \approx 2^{21}$ segundos, de modo que solo uno de cada dos

millones de momentos del observador recordará haber sobrevivido durante veinte segundos. Tal como señaló Paul Almond, esto significa que los que hayan sobrevivido todo ese intervalo deberían descartar toda la premisa (que se están sometiendo a un experimento de inmortalidad) con un 99,99995 % de seguridad. En otras palabras, nos hallamos ante una situación muy singular desde un punto de vista filosófico: se parte de una teoría correcta sobre lo que estaba ocurriendo, se formula una predicción sobre lo que ocurriría (que se sobrevivirá), se confirma mediante la observación que la predicción fue correcta y, sin embargo, a continuación se da un giro y se declara ¡que la teoría queda descartada! Es más, tal como comentamos en el capítulo 8, cuanto más tiempo pase se empezarán a experimentar coincidencias cada vez más extrañas que irán salvando la vida del sujeto del experimento de formas cada vez más inverosímiles; apagones, impactos de asteroides, etc., que probablemente bastarían para que la mayoría de las personas empezaran a dudar de sus suposiciones acerca de la realidad…

Problemas infinitos

¿Qué nos dice el problema de la medida? He aquí mi parecer: que en los fundamentos de la física moderna hay una suposición que es un error de base. Los fallos de la mecánica clásica nos exigieron pasar a la mecánica cuántica, y considero que las mejores teorías actuales también requieren una gran reestructuración semejante. Nadie sabe con seguridad dónde está la raíz del problema, pero yo tengo mis sospechas. Esta es mi mayor sospecha: ∞.

En realidad tengo dos sospechas: lo «infinitamente grande» y lo «infinitamente pequeño». Con *infinitamente grande* me refiero a la idea de que el espacio pueda tener un volumen infinito, de que el tiempo pueda continuar para siempre, y de que pueda haber una cantidad infinita de objetos físicos. Con *infinitamente pequeño* me refiero al continuo: la idea de que incluso un litro de espacio contenga una cantidad infinita de puntos, de que el espacio se pueda expandir indefinidamente sin que pase nada malo, y de que existan cantidades en la naturaleza que puedan variar de manera continua. Ambas cosas están muy relacionadas: en el capítulo 5 vimos que la inflación creaba un volumen infinito a base de expandir un espacio continuo de manera indefinida.

No disponemos de ningún indicio observacional directo ni de lo infinitamente grande ni de lo infinitamente pequeño. Hablamos de volúmenes infinitos con una cantidad infinita de planetas, pero nuestro universo observable solo contiene unos 10^{89} objetos (la mayoría de ellos, fotones). Si

el espacio es un verdadero continuo, para describir incluso algo tan simple como la distancia entre dos puntos se precisa una cantidad infinita de información, especificada por un número con una cantidad infinita de cifras decimales. En la práctica, los físicos nunca hemos conseguido medir nada con más de 16 cifras decimales.

Me recuerdo recelando de lo infinito ya desde adolescente, y cuanto más aprendo, más desconfiado me vuelvo. Sin lo infinito no existiría el problema de la medida, porque siempre calcularíamos las mismas fracciones con independencia del orden en que contáramos. Sin lo infinito no habría inmortalidad cuántica.

Mi escepticismo ante lo infinito me sitúa dentro de una minoría muy reducida de la comunidad de físicos. En matemáticas, lo infinito y el continuo suelen despertar bastante recelo. Carl Friedrich Gauss, considerado en ocasiones el «matemático más excelso desde la antigüedad», dijo esto al respecto dos siglos atrás: «Protesto contra el uso de la magnitud infinita como algo completo, porque me parece algo inadmisible en matemáticas. El infinito no es más que un modo de hablar, y su verdadero significado es que se trata de un límite al que ciertas fracciones se acercan indefinidamente, mientras que otras pueden crecer sin ninguna restricción». Criticando el continuo y otras ideas relacionadas, su colega Leopold Kronecker, más joven que él, dijo una vez: «Dios creó los enteros; todo lo demás es obra del hombre». En el siglo pasado, en cambio, el infinito se convirtió en algo convencional dentro de las matemáticas, y solo quedaron algunas voces críticas; así, por ejemplo, el matemático australiano canadiense Norman Wildberger ha publicado un ensayo en el que sostiene que «los números reales son un chiste».

Entonces, ¿por qué están tan encandilados los físicos y matemáticos actuales con el infinito y casi nunca lo cuestionan? Sobre todo, debido a que el infinito constituye una aproximación muy útil, y no hemos descubierto buenas alternativas. Por ejemplo, piense usted en el aire que lo rodea. Sería desesperante efectuar un seguimiento de las posiciones y velocidades de los miles de cuatrillones de átomos que lo conforman. Pero si se ignora el hecho de que el aire se compone de átomos, y en su lugar se echa mano de una aproximación y se considera como un continuo, una sustancia regular con una densidad, presión y velocidad en cada punto, entonces se comprueba que esa idealización del aire obedece una ecuación simple que explica casi todo lo que nos interesa sobre él, desde la propagación de ondas sonoras a su través, hasta el funcionamiento de las alas de los aviones. Sin embargo, a pesar de todas esas ventajas, el aire no es un continuo. ¿Podría ocurrir lo mismo con el

espacio, el tiempo y todos los demás elementos constitutivos esenciales de nuestro mundo físico? Exploraremos esta idea en el siguiente capítulo.

SUMARIO

- Las estructuras matemáticas son eternas e inmutables: no existen dentro del espacio y del tiempo, sino que el espacio y el tiempo existen en (algunas de) ellas. Si la historia cósmica fuera una película, la estructura matemática sería el conjunto del DVD.
- La hipótesis del universo matemático (HUM) implica que el fluir del tiempo es una ilusión, igual que el cambio.
- La HUM implica que la creación y la destrucción son ilusiones, puesto que guardan relación con el cambio.
- La HUM implica que no solo el espaciotiempo es una estructura matemática, sino también toda la materia que alberga, incluidas las partículas de las que estamos hechos nosotros. Desde un punto de vista matemático, esta materia parece corresponderse con «campos»; números en cada punto del espaciotiempo que codifican lo que hay en ellos.
- La HUM implica que los humanos somos una estructura autoconsciente que forma parte de la estructura matemática. En la teoría de la gravitación de Einstein somos una estructura extraordinariamente compleja en forma de trenza dentro del espaciotiempo, cuyo intrincado patrón se corresponde con el procesamiento de información y la autoconsciencia. En la mecánica cuántica el patrón en forma de trenza de cada cual se ramifica como un árbol.
- La realidad subjetiva semejante a una película que percibimos en este momento existe tan solo en nuestra mente, como parte del modelo de la realidad que portamos en el cerebro, y no solo incluye instantes procesados correspondientes al aquí y al ahora, sino también una selección de acontecimientos distantes y pretéritos, registrados con anterioridad, que crean la ilusión de que el tiempo fluye.
- Tenemos consciencia de nosotros mismos, y no tan solo consciencia, porque el modelo de la realidad que portamos en el cerebro incluye un modelo de nosotros mismos y de la relación que mantenemos con el mundo exterior: las percepciones de esa atalaya subjetiva que llamamos «yo» son qualia, igual que lo son las percepciones subjetivas de lo «rojo» o lo «dulce».

- La teoría de que la realidad física exterior se describe a la perfección mediante una estructura matemática sin que en realidad lo sea: es 100 % acientífica en el sentido de que no efectúa ninguna predicción observable en absoluto.
- Sería de esperar que su momento actual del observador fuera uno normal de entre todos los momentos del observador que implican la misma sensación subjetiva. Este planteamiento conduce a conclusiones controvertidas en relación con el fin de la humanidad, la estabilidad del universo, la validez de la inflación cosmológica, y si usted es o no un cerebro sin cuerpo, o una simulación.
- Asimismo, también conduce al denominado problema de la medida, un escollo científico considerable, que cuestiona la capacidad de la física para predecir lo que sea.

12
El multiverso del nivel IV

¿Qué es lo que insufla fuego a las ecuaciones y crea un universo para que ellas lo describan?

Stephen Hawking

Por qué creo en el multiverso del nivel IV

¿Por qué estas ecuaciones y no otras?

Imagine que se dedica usted a la física y que descubre la manera de unificar todas las leyes físicas en una «teoría del todo». El empleo de sus ecuaciones matemáticas le permite responder a las complejas preguntas que quitan el sueño a los físicos de hoy, como el funcionamiento de la gravitación cuántica y la resolución del problema de la medida. Una camiseta con esas ecuaciones se convierte en un superventas y recibe usted el Premio Nobel. Le invade la euforia, pero la noche previa a la ceremonia de entrega de premios, no logra conciliar el sueño porque lo acosa una molesta cuestión planteada por mi héroe John Wheeler que aún no se ha respondido: *¿Por qué esas ecuaciones en particular y no otras?*

En los dos capítulos anteriores he defendido la hipótesis del universo matemático (HUM), según la cual nuestra realidad física exterior es una estructura matemática, y esto agudiza el interrogante de Wheeler. Los matemáticos han descubierto gran cantidad de estructuras matemáticas, y la figura 12.1 ilustra algunas de las más simples en forma de cajas. Ninguna de las que aparecen en la figura concuerda con nuestra realidad física, por mucho que algunas de ellas alcancen a describir determinados aspectos limitados de este mundo. En 1916, la caja etiquetada como «RELATIVIDAD GENERAL» se consideró una buena candidata para lograr una concordancia perfecta, porque no solo contenía espacio y tiempo, sino también varias clases de

materia; sin embargo, el descubrimiento de la mecánica cuántica no tardó en evidenciar que nuestra realidad física porta aspectos inexistentes en esa estructura matemática particular. Por suerte, ahora podemos ampliar la figura añadiéndole la estructura que acaba de descubrir usted y que le ha valido el Nobel, sabiendo que esta caja nueva en la figura es *la* caja, la que se corresponde con nuestra realidad física.



Figura 12.1: Relaciones entre varias estructuras matemáticas básicas. Las flechas indican en general la adición de nuevos símbolos y/o axiomas. La unión de dos flechas indica la combinación de estructuras; por ejemplo, u álgebra es un espacio vectorial que también es un anillo, y un grupo de Lie es un grupo que también es una variedad. Lo más probable es que el conjunto íntegro del árbol genealógico tenga una extensión infinita; la figura solo ilustra una pequeña muestra cercana a la base.

Llegados a este punto, oigo que la afable voz de John Wheeler objeta: *¿Y qué hay del resto de cajas?* Si su caja se corresponde con una realidad física

existente, ¿por qué las demás no?

Todas las cajas se sitúan en un nivel matemático equitativo, el correspondiente a distintas estructuras matemáticas, de modo que ¿por qué razón unas tendrían que ser más iguales que otras cuando se trata de la existencia física? ¿De verdad podría haber una asimetría fundamental, existencial, inexplicada, inherente a la mismísima esencia de la realidad que divida las estructuras matemáticas en dos clases, las que tienen existencia física y las que no?

Democracia matemática

Esta cuestión llegó a importunarme de verdad aquella velada de 1990, en Berkeley, cuando se me ocurrió por primera vez la idea del universo matemático y le hablé de ella a mi amigo Bill Poirier en medio del pasillo de la cuarta planta de la International House donde teníamos los dormitorios. Así fue hasta que se me encendió una luz en la cabeza y me di cuenta de que hay una vía para salir de este rompecabezas filosófico. Le dije a Bill que hay una democracia matemática absoluta: que la existencia matemática y la existencia física son equivalentes, de modo que *todas* las estructuras que existen en el ámbito matemático también existen en el ámbito físico. Así que el resto de cajas de la figura 12.1 también describe un universo físico real, solo que uno distinto del que casualmente habitamos nosotros. Esto se puede interpretar como una forma de platonismo radical, pues afirma que todas las estructuras matemáticas del «mundo de las ideas» de Platón existen «ahí fuera» en un sentido físico.

En otras palabras, la idea es que existe un cuarto nivel de universos paralelos que es mucho más extenso que los tres que hemos visto hasta ahora y que se corresponde con las distintas estructuras matemáticas. Los tres primeros niveles se corresponden con universos paralelos incomunicados dentro de la misma estructura matemática: el nivel I se refiere sencillamente a regiones distantes desde las que la luz aún no ha tenido tiempo de alcanzarnos; el nivel II cubre regiones eternamente inalcanzables debido a la inflación cosmológica del espacio intermedio, y el nivel III, la «pluralidad de mundos» de Everett, guarda relación con partes incomunicadas del espacio de Hilbert de la mecánica cuántica. Mientras que todos los universos paralelos de los niveles I, II y III se rigen por las mismas ecuaciones matemáticas fundamentales (que describen la mecánica cuántica, la inflación, etc.), los universos paralelos del nivel IV bailan al son de ecuaciones diferentes, correspondientes a estructuras matemáticas distintas. La figura 12.2 ilustra

esta jerarquía de cuatro niveles de multiverso, una de las ideas centrales de este libro.

La hipótesis del universo matemático implica el multiverso del nivel IV

Si la teoría de que existe el multiverso del nivel IV es correcta, entonces, como no tiene ni un solo parámetro libre, un matemático infinitamente inteligente podría, en principio, deducir todas las propiedades de todos los universos paralelos (incluidas las percepciones subjetivas de las subestructuras autoconscientes que albergan). Pero ¿es correcta esta teoría? ¿De verdad existe el multiverso del nivel IV?

Curiosamente, en el contexto de la hipótesis del universo matemático (HUM), la existencia del multiverso del nivel IV no es opcional. Tal como analizamos en detalle en el capítulo anterior, la HUM dice que una estructura matemática *es* nuestra realidad física exterior, y no una mera *descripción* de la misma. Esta equivalencia entre la existencia física y la matemática significa que si una estructura matemática contiene una subestructura autoconsciente, esta se percibirá existiendo dentro de un universo físico real, igual que usted o que yo (aunque en general se tratará de un universo con unas propiedades diferentes a las del nuestro). Es bien conocida la pregunta que planteó Stephen Hawking: «¿Qué es lo que insufla fuego a las ecuaciones y crea un universo para que ellas lo describan?». Pues bien, la HUM no requiere insuflar ningún fuego, porque la clave no estriba en que una estructura matemática *describe* un universo, sino en que *es* un universo. Es más, tampoco es necesario *crear* nada. No se puede *crear* una estructura matemática, sino que existe sin más. No existe en el espacio ni en el tiempo, el espacio y el tiempo pueden existir en ella. En otras palabras, todas las estructuras que existen en términos matemáticos tienen el mismo estatus ontológico, y la cuestión más interesante no es cuáles existen físicamente (todas ellas lo hacen), sino cuáles albergan vida, y tal vez a nosotros. Muchas estructuras matemáticas (el dodecaedro, por ejemplo) carecen de complejidad suficiente para mantener alguna clase de subestructura autoconsciente, así que es muy probable que el multiverso del nivel IV se parezca a un vasto y casi inhabitable desierto donde la vida está confinada a raros oasis, estructuras matemáticas aptas para la vida como la que habitamos nosotros. De manera análoga, en el capítulo 6 encontramos signos de que el multiverso del nivel II es en su mayoría un páramo estéril donde la autoconsciencia está confinada a la diminuta fracción del espacio que elegiría Ricitos de Oro, donde el valor de

la densidad de la energía oscura y otros parámetros físicos son justo los adecuados para la vida. En el multiverso del nivel I, la historia parece repetirse porque la vida prospera sobre todo en la reducida fracción de espacio cercana a superficies planetarias. Por tanto, ¡los humanos nos encontramos realmente en un lugar muy privilegiado!

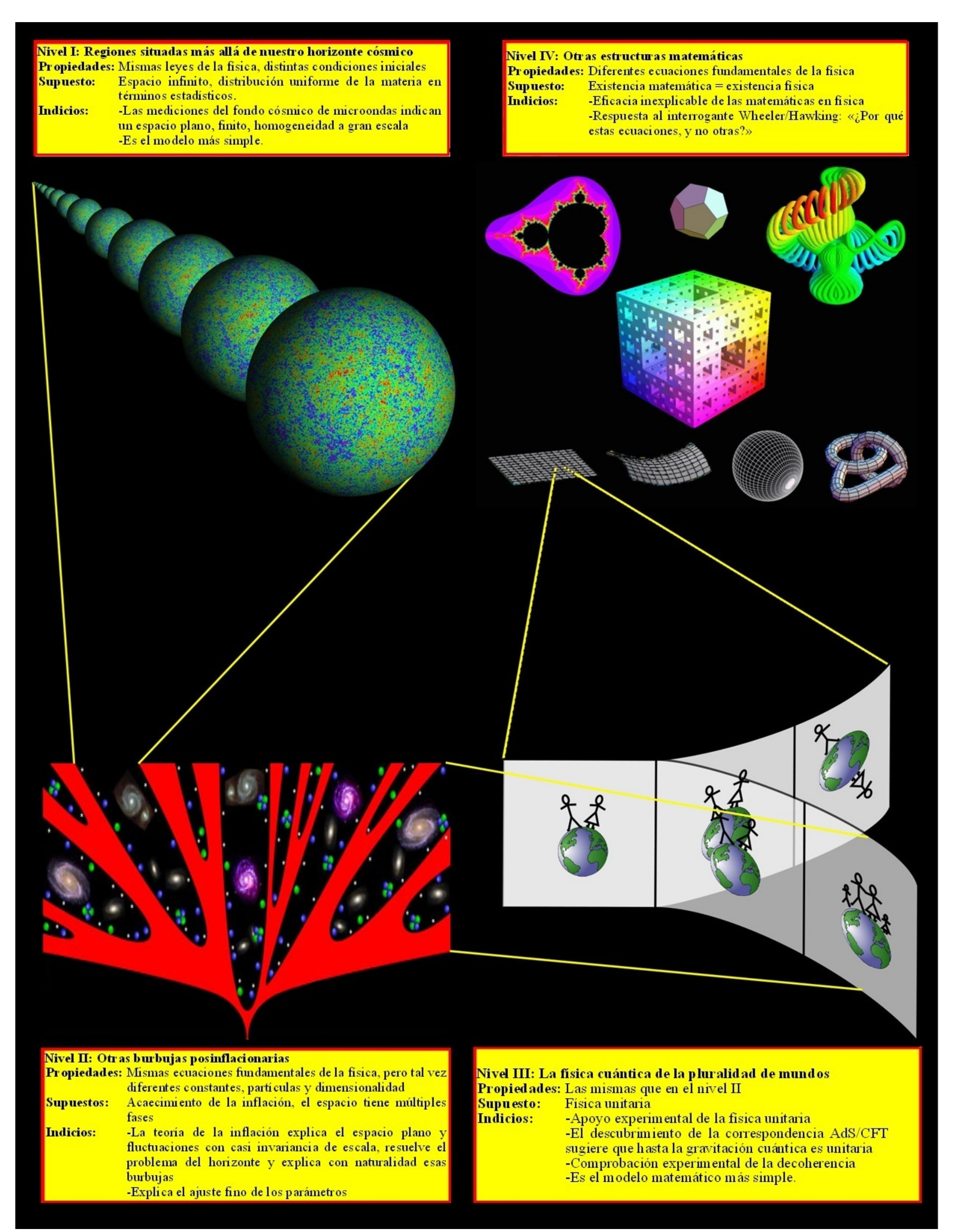


Figura 12.2: Los universos paralelos descritos en este libro forman una jerarquía de cuatro niveles donde cada multiverso es un solo miembro de los muchos que hay en el nivel superior.

Exploración del multiverso del nivel IV: ¿qué hay ahí fuera?

Nuestro vecindario más inmediato

Ahora dedicaremos un poco de tiempo a explorar el multiverso del nivel IV y el variado zoo de estructuras matemáticas que contiene, y empezaremos por nuestro vecindario más próximo. Aunque aún no sabemos en qué estructura matemática exacta residimos, no es difícil imaginar numerosas modificaciones menores que darían lugar a otras estructuras matemáticas válidas. Por ejemplo, el modelo estándar de la física de partículas implica ciertas simetrías que los matemáticos denominan $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, y si las sustituimos por simetrías distintas, obtendremos una estructura matemática con diferentes tipos de partículas y fuerzas, donde quarks, electrones y fotones sean reemplazados por otras entidades con otras propiedades. En algunas estructuras matemáticas no hay luz. En otras, no hay gravitación. En la descripción matemática de Einstein del espaciotiempo, los números 1 y 3, que especifican respectivamente la cantidad de dimensiones temporales y espaciales, se pueden sustituir por distintos valores a nuestro antojo.

Aunque en el capítulo 6 ya vimos que la inflación de una sola estructura matemática, con su conjunto particular de leyes *fundamentales* de la física, puede dar lugar a diferentes leyes *efectivas* de la física en distintas partes del espacio, y formar así un multiverso del nivel II, ahora hablamos de algo más radical, donde cambian incluso las leyes fundamentales, donde, por ejemplo, no hay mecánica cuántica. Si la teoría de cuerdas se puede definir con rigor a través de las matemáticas, entonces existe una estructura matemática donde la teoría de cuerdas es la «teoría del todo correcta», pero no lo es en ningún otro lugar del multiverso del nivel IV.

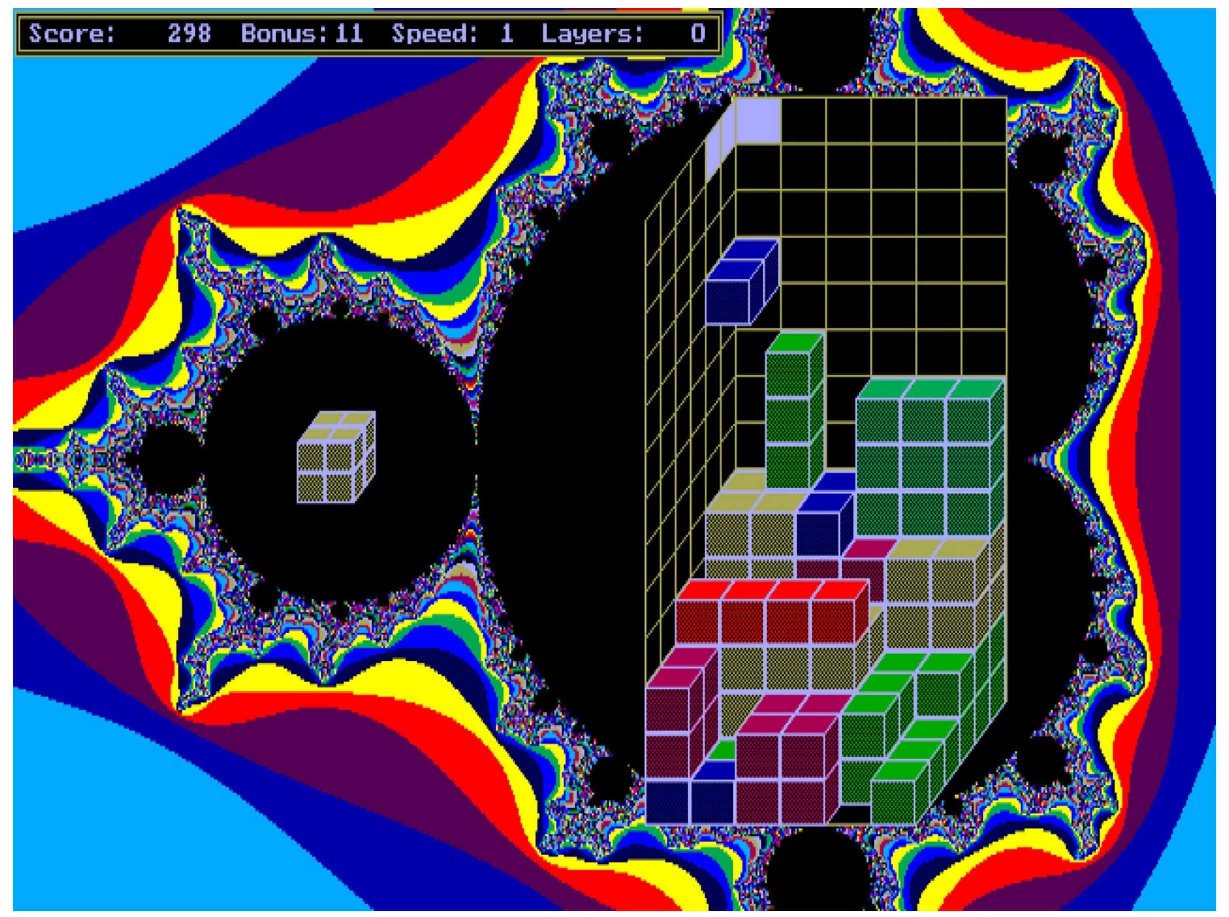


Figura 12.3: El clon 3D del Tetris llamado FRAC representa a una estructura matemática donde tanto el espacio como el tiempo son discretos en lugar de continuos.

Para contemplar el multiverso del nivel IV hay que dejar volar la imaginación, libre de cualquier idea preconcebida sobre cómo se supone que son las leyes de la física. Consideremos el espacio y el tiempo: en lugar de ser continuos, tal como sugiere nuestro mundo, pueden ser discretos, como en los juegos de ordenador PAC-MAN y Tetris, o como en el *Juego de la vida* de John Conway, donde el movimiento solo ocurre a saltos. Todos estos juegos se corresponden con estructuras matemáticas válidas, siempre que se desconecte la posibilidad de que el usuario intervenga, de modo que sea posible calcular de manera determinista la evolución temporal. Por ejemplo, la figura 12.3 muestra el clon del Tetris 3D llamado FRAC que mencioné en el capítulo 3 y que escribí junto con mi amigo Per Bergland en el año 1990. Si se juega con él sin tocar el teclado (aunque no sea la mejor estrategia para conseguir muchos puntos…), toda la partida, de principio a fin, se regirá por unas reglas matemáticas simples del programa que lo convierten en una estructura matemática que forma parte del multiverso del nivel IV. Se ha especulado mucho con la idea de que incluso nuestro propio universo tal vez

exhiba alguna suerte de discretización espaciotemporal oculta a escalas tan pequeñas que aún no la hemos detectado.

Siendo más radicales todavía, hay muchas estructuras matemáticas que prescinden por completo del espacio y el tiempo, así que en ellas no sucede nada significativo. La mayoría de las estructuras ejemplificadas en la figura 12.4 son de este tipo; así, dentro del abstracto dodecaedro no ocurre nada, porque esta estructura matemática no contiene ningún tiempo.

Nuestro código postal dentro del multiverso del nivel IV

Código de cifrado	Estructura matemática
100	Conjunto vacío
105	Conjunto de 5 elementos
113100120	Rotaciones de triángulos
11220000110	El grupo C_2
11220001110	Álgebra booleana
1132000012120201	El grupo C_3
12410002311003102	Rotaciones de tetraedros
1261000243511005 10243	Rotaciones de cubos
2142200101001111 01110111	Gráfica «cometa»
1281001230567410015620473	Rotaciones de octaedros

Figura 12.4: Un programa de ordenador puede generar de forma automática una lista maestra y ordenada de todas las estructuras matemáticas finitas, donde cada una esté codificada como una secuencia de números. Esta tabla muestra algunos ejemplos usando el esquema de cifrado que figura en mi artículo sobre el universo matemático de 2007. Los nombres y diagramas de la columna de la derecha son bagaje redundante que refleja algunas formas humanas de nombrar e ilustrar estas estructuras.

Tal como vimos en el capítulo 10, una estructura matemática no es más que un conjunto de elementos abstractos que mantienen relaciones entre sí. Para efectuar un análisis sistemático del multiverso del nivel IV, se puede escribir un programa de ordenador que genere de manera automática una lista con las estructuras matemáticas que existen, empezando por las más simples y siguiendo de forma progresiva hasta las más complejas. La figura 12.4 muestra 10 entradas de una lista de ese tipo que usa el esquema de cifrado que describí en mi artículo del año 2007 sobre el universo matemático (**http://arxiv.org/pdf/07040646.pdf**). Los detalles de ese sistema de cifrado no son relevantes para el tema que nos ocupa, salvo el hecho de que tiene la excelente propiedad de que *todas* las estructuras matemáticas con un número

finito de elementos figuran en algún lugar de la lista. De modo que todas y cada una de esas estructuras matemáticas se pueden identificar mediante número unívoco: su número de línea dentro de esta lista maestra.

En el caso de las estructuras matemáticas finitas, todas las relaciones se pueden describir mediante tablas finitas de números, lo que generaliza la idea de la tabla de multiplicar a otros tipos de relaciones. Con estructuras formadas por gran cantidad de elementos, estas tablas se vuelven grandes y abultadas, lo que genera cifrados enormes que acaban en puestos muy avanzados de la lista. En cambio, una pequeña fracción de estas estructuras tan largas contiene una simplicidad elegante que facilita mucho su descripción. Consideremos, por ejemplo, la estructura matemática cuyos elementos sean los números 0, 1, 2, 3… y donde las relaciones sean la suma y la multiplicación. Sería un despilfarro inmenso especificar cómo funciona la multiplicación escribiendo una inmensa tabla de multiplicar para todos los pares de números: aunque nos limitáramos al primer millón de números, necesitaríamos una tabla con un millón de filas y un millón de columnas, la cual contendría un billón de entradas. En lugar de hacer eso, enseñamos a los niños en edad escolar una tabla de multiplicar para los 10 primeros números y un sencillo algoritmo para que sepan usarla para multiplicar números mayores con más de un dígito. A los ordenadores les describimos la multiplicación de un modo mucho más eficiente que a nuestros pequeños: representando los números en sistema binario, lo que tan solo nos obliga a especificar una tabla de multiplicar de 2×2 para ceros y unos, y un escueto programa de ordenador que especifica cómo usarla para multiplicar números de cualquier tamaño.

Los programas informáticos se almacenan de un modo tan simple como una ristra de ceros y unos (una *cadena de bits*), lo que se puede interpretar como un solo número entero escrito en código binario. Esto nos brinda un sistema alternativo para cifrar y enumerar las estructuras matemáticas de la figura 12.4: cada estructura matemática se representa mediante el número cuya cadena de bits constituye el programa informático más breve cuyas funciones definen todas las relaciones de la estructura. Ahora las estructuras aparecerán en los primeros puestos de la lista, ya que se describen de manera simple, aunque sean estructuras inmensas en cuanto a cantidad de elementos. Los iniciadores de la teoría de la complejidad Ray Solomonoff, Andréi Kolmogórov y Gregory Chaitin han definido la complejidad algorítmica (o simplemente la *complejidad*, para abreviar) de una cadena de bits como la longitud en bits de su descripción autocontenida más breve como, por ejemplo, un programa informático que dé como resultado esa cadena. Esto

significa que nuestra lista maestra alternativa clasifica las estructuras matemáticas por orden de complejidad creciente.

Una característica interesante de este tipo de lista es que también gestiona estructuras matemáticas con una cantidad infinita de elementos. Por ejemplo, para definir la estructura matemática de todos los números enteros con adición y multiplicación, basta con especificar el programa de ordenador más pequeño capaz de leer números de cualquier tamaño, así como de sumarlos y multiplicarlos: *Mathematica* y otros paquetes informáticos de manipulación algebraica portan justamente este tipo de algoritmos. Por lo común se consiguen buenas aproximaciones a estructuras matemáticas que implican una cantidad infinita de puntos sobre un continuo (como el espaciotiempo, los campos electromagnéticos y las funciones de onda) mediante estructuras finitas que también se pueden procesar en un ordenador. De hecho, así es como mis colegas y yo desarrollamos la mayoría de nuestros cálculos de física teórica en la práctica.

En resumen, el multiverso del nivel IV se puede cartografiar de manera sistemática mediante la enumeración de estructuras matemáticas con una computadora y el estudio de sus propiedades. Si algún día logramos identificar en qué estructura matemática residimos, entonces podremos referirnos a ella por su número dentro de la lista general, y especificar por primera vez nuestra dirección dentro del conjunto completo de la realidad física, tal como se ilustra de forma fantasiosa en la figura 12.5. Los países de la Tierra siguen esquemas diversos para especificar direcciones: por ejemplo, los hay que usan códigos postales de números, otros utilizan códigos postales de letras y otros no recurren a ningún código postal. De manera análoga, la forma de escribir la parte más local de nuestra dirección variará de una estructura matemática a otra: la mayoría no incluye ni mecánica cuántica ni inflación, y por tanto carece de los niveles II, II y I, así como de planetas, mientras que otras pueden contener otras clases de universos paralelos que ni siquiera alcanzamos a imaginar aún.



Max Tegmark
Dpto. de Física, MIT
Avenida Massachusetts, 77
02139 Cambridge, MA, Estados Unidos de América
Planeta 31415926535897932384626
Volumen de Hubble 43383279502884197169399375105
Burbuja posinflacionaria 820974944592307816406286
Rama cuántica 20899862803482534211706798
Estructura matemática 21480865132823066470938

Figura 12.5: Para especificar mi dirección en el conjunto completo de la realidad física, debo indicar mi localización dentro del multiverso del nivel IV (mi número de estructura matemática), dentro del multiverso del nivel III (mi rama de la función de onda cuántica), dentro del multiverso del nivel II (mi burbuja posinflacionaria), dentro del multiverso del nivel I (mi volumen de horizonte) y dentro de nuestro universo. Solo he indicado números finitos en este ejemplo, aunque es posible que cada uno de los cuatro niveles cuente con una cantidad infinita de miembros, lo que implicaría que mi dirección real consistiría en números tan descomunales que no cabrían en ningún sobre.

La estructura del multiverso del nivel IV

Resulta interesante estudiar el multiverso del nivel IV. Si aceptamos la definición formalista más extendida de las matemáticas como «el estudio de estructuras matemáticas», entonces lo que hacen los matemáticos a diario para ganarse la vida es estudiar el multiverso del nivel IV. Para un físico como yo que cree en la hipótesis del universo matemático, su estudio equivale asimismo a explicar la realidad física última y buscar qué lugar ocupamos dentro de ella. Y, tal como corresponde, es más fácil explorar el multiverso del nivel IV que cualquier otro multiverso inferior o incluso nuestro propio universo, porque para ello no se necesitan cohetes ni telescopios, ¡basta con ordenadores e ideas! Por eso he disfrutado tanto durante años escribiendo programas informáticos para realizar las tabulaciones y clasificaciones de estructuras matemáticas como las que acabamos de comentar.

Al llevar esto a la práctica nos encontramos ante una cantidad enorme de redundancia. Existen muchas maneras de escribir un programa informático para que ejecute un cálculo determinado, y hay una cantidad igual de grande de maneras equivalentes de describir estructuras matemáticas finitas mediante tablas de números, que se corresponden, por ejemplo, con distintas maneras de ordenar/etiquetar los elementos. Tal como argumentamos en el capítulo 10, una estructura matemática es una clase de equivalencia entre descripciones, de modo que la lista maestra debería contener cada estructura matemática tan

solo una vez, especificada únicamente por aquella de sus numerosas descripciones equivalentes que fuera más breve.

A partir de dos estructuras matemáticas cualesquiera, se puede definir una nueva mediante la combinación de sus elementos y relaciones. Muchas de las estructuras que figuran en la lista maestra son de esta clase compuesta, y para estudiar el multiverso del nivel IV tiene sentido ignorarlas. Esto es así porque no hay relaciones que conecten ambas partes, lo que significa que un observador autoconsciente en una de esas partes no será jamás consciente de la existencia de la otra parte, ni se verá afectado por ella, de modo que también podrá actuar como si la otra parte no existiera (o no formara parte de su estructura matemática). El único motivo por el que podrían importar las estructuras compuestas sería si intervinieran en la resolución del problema de la medida, lo que alteraría la probabilidad que le asignaríamos de residir en estructuras matemáticas distintas. Como una estructura compuesta es más complicada de describir, lo normal es que aparezca en un puesto mucho más avanzado dentro de la lista maestra que sus partes, lo que daría una «medida» más baja. De hecho, para cualquier cantidad finita de estructuras en el multiverso del nivel IV, también hay una estructura compuesta única situada muchísimo más abajo dentro de la lista maestra que las contiene todas.

Aunque las distintas estructuras matemáticas del multiverso del nivel IV no mantienen ninguna conexión física, hay muchas relaciones interesantes entre ellas en el metanivel. Por ejemplo, acabamos de ver que algunas consisten en la combinación de otras. Otro ejemplo es que una estructura puede describir otra en un sentido determinado: los elementos de la primera estructura pueden corresponderse con las relaciones que se dan en la segunda, y las relaciones en la primera pueden describir lo que ocurre cuando se combinan relaciones en la segunda. De este modo, la estructura de rotaciones de cubos que aparece en la figura 12.4, formada por 24 relaciones, se describe mediante lo que en matemáticas se denomina el «grupo de las rotaciones de un cubo», una estructura que cuente con 24 elementos correspondientes a todas las rotaciones posibles que permitan que un cubo perfecto parezca no haber cambiado. Muchas estructuras matemáticas distintas comparten estas simetrías del cubo y por tanto tienen cierto derecho a reivindicar que ellas son *el* cubo (por ejemplo, las estructuras cuyos elementos son caras, vértices o aristas y cuyas relaciones especifican o bien cómo reordenan las rotaciones esos elementos o bien cuál es contiguo a cuál).

Los límites del multiverso del nivel IV: indecidible, incomputable e indefinido

¿Qué dimensiones tiene el multiverso del nivel IV? Para empezar, hay una cantidad infinita de estructuras matemáticas finitas. Una cantidad igual de infinita que los números 1, 2, 3…, para ser más precisos, ya que acabamos de ver que se pueden relacionar en una sola lista numerada. Pero ¿cuántas estructuras matemáticas infinitas formadas por una cantidad infinita de elementos contiene el multiverso del nivel IV? Hemos visto que algunas estructuras infinitas también se pueden definir e incluir en la lista maestra junto con las estructuras finitas, mediante el empleo de programas informáticos que definan sus relaciones. Sin embargo, la inclusión del infinito abre una caja de Pandora repleta de problemas ontológicos. Para verlo, consideremos una estructura matemática cuyos elementos sean los números 1, 2, 3… que incluya las tres relaciones (funciones) de la siguiente lista, reglas que toman los números como entrada y calculan un nuevo número siguiendo las definiciones relacionadas en la lista:

1. *P(n):* Dado un número *n*, *P(n)* denota el número primo más bajo que es mayor que *n*.
2. *G(n)*: Dado un número *n*, *G(n)* denota el primo gemelo más bajo que es mayor que *n* (un primo gemelo es un número primo separado de otro número primo por un número intermedio; 11 y 13 son un ejemplo de par de primos gemelos).
3. *H(m,n)*: Dados dos números *m* y *n*, *H*(*m*,*n*) vale 0 si el programa informático que ocupa el puesto *m* en la lista maestra de todos los programas informáticos seguirá ejecutándose eternamente al proporcionarle los bits de *n* como entrada, y *H*(*m*,*n*) vale 1 si, por el contrario, el programa se detiene tras una cantidad finita de pasos.

¿Es apta esta estructura para formar parte del multiverso del nivel IV, o no está lo bastante bien definida? La primera función, *P*(*n*), es pan comido: es fácil escribir un programa que empiece comprobando si los números que siguen a *n* son primos, y que se detenga en cuanto encuentre uno que lo sea. Y es indudable que tal programa se detendrá después de una cantidad finita de pasos, porque sabemos que existe una infinidad de números primos (un hecho demostrado por Euclides más de dos mil años atrás). Así que *P*(*n*) es un ejemplo de lo que se denomina una *función computable*.

La segunda función, *G(n)*, es más delicada: nuevamente resulta sencillo escribir un programa que analice todos los números que siguen a *n* para comprobar si alguno de ellos forma parte de un par de primos gemelos, pero si introducimos en el programa un número *n* mayor que $37\,568\,016\,956\,852^{666\,669} - 1$ (el número que forma parte de un par de primos gemelos más grande conocido en el momento en que escribo esto), no habrá ninguna garantía de que el programa llegue a detenerse en algún momento y dé un resultado porque, a pesar de los enormes esfuerzos de los matemáticos más perspicaces, seguimos sin saber si existe una cantidad infinita de números primos gemelos. Así que por ahora desconocemos si *G(n)* es una función computable y, por tanto, si está definida con rigor, y es discutible si una estructura matemática que contenga una relación con una especificación tan laxa se puede considerar bien definida.

La tercera función, *H(m,n)*, resulta aún más nefasta: los iniciadores de las ciencias de la computación Alonzo Church y Alan Turing determinaron que no existe *ningún* programa capaz de computar *H(m,n)* con la introducción arbitraria de números *m* y *n* en una cantidad finita de pasos, de modo que *H(m,n)* es un ejemplo de lo que se denomina una *función no computable*. En otras palabras, no hay ningún programa capaz de concretar qué otros programas acabarán deteniéndose. Desde luego, cualquier programa dado acabará deteniéndose o no, pero la clave está en que, al igual que con los primos gemelos, habría que esperar eternamente para saberlo. El descubrimiento Church-Turing de las funciones no computables está muy relacionado con el hallazgo por parte del lógico Kurt Gödel de que algunos teoremas aritméticos son indecidibles, lo que significa que ni pueden demostrarse ni pueden refutarse en una cantidad finita de pasos.

¿Cabría considerar una estructura matemática como bien definida aun cuando contenga una relación como *H* que ni siquiera se puede valorar con una computadora de una capacidad ilimitada? En tal caso, la estructura solo sería cognoscible para una entidad a modo de oráculo que de algún modo dispusiera de poderes infinitos y fuera capaz de efectuar una cantidad realmente infinita de pasos computacionales para llegar a una respuesta. Tales estructuras jamás aparecen en la lista maestra de la que hablamos antes, la cual abarca tan solo estructuras definibles mediante programas informáticos convencionales, y no las que precisan los poderes infinitos propios de un oráculo.

Por último, consideremos una de las estructuras matemáticas más populares de nuestro tiempo: la de los llamados números reales, como

3,141592…, cuyos decimales no se acaban nunca. Forman un continuo, y para especificar incluso un único elemento hay que relacionar una cantidad infinita de decimales, es decir, una cantidad infinita de información. Esto significa que los programas informáticos convencionales son absolutamente incapaces de procesarlos: el problema no estriba tan solo en ejecutar una cantidad infinita de pasos computacionales sobre una entrada finita, como en el ejemplo de H, sino en introducir y extraer una cantidad infinita de información.

Por otro lado, el trabajo de Kurt Gödel debería hacernos temer que la HUM carezca de sentido con estructuras matemáticas infinitas porque, en cierto modo, nuestro universo sería incoherente o indefinido. Si aceptamos el aforismo del matemático David Hilbert de que «la existencia matemática consiste tan solo en estar libre de contradicciones», entonces una estructura incoherente no existiría en el mundo matemático, y no digamos ya en el mundo físico de la HUM. El modelo físico estándar actual incluye a diario estructuras matemáticas tales como los números enteros y los números reales. Pero el trabajo de Gödel deja abierta la posibilidad de que las matemáticas cotidianas sean incoherentes, y de que exista dentro de la propia teoría de números una demostración con una longitud finita que concluya que $0 = 1$. Echando mano de este impactante resultado, cualquier otro enunciado sintácticamente correcto sobre los números enteros se podría demostrar cierto a su vez, y las matemáticas se derrumbarían como un castillo de naipes.

Entonces ¿queda descartada la hipótesis del universo matemático por el teorema de incompletitud de Gödel? No, ¡al menos no hasta donde sabemos! Gödel evidenció que, dado cualquier sistema formal lo bastante potente, no podemos usarlo para demostrar su propia coherencia, pero eso no significa que sea incoherente en realidad, o que tengamos un problema. De hecho, nuestro cosmos no muestra ningún signo de ser incoherente o de estar mal definido, a pesar de revelar indicios de que es una estructura matemática. Es más: ¿qué esperábamos? Aunque un sistema formal pudiera emplearse para demostrar su propia coherencia, seguiríamos sin convencernos de su verdadera coherencia, puesto que un sistema incoherente puede demostrar cualquier cosa, incluso su coherencia. Podríamos convencernos si un sistema más simple cuya coherencia nos infundiera mayor confianza pudiera demostrar la coherencia de un sistema más poderoso pero, como era de esperar, eso es imposible, tal como también demostró Gödel. Jamás he oído decir a ninguno de mis numerosos amigos matemáticos que las estructuras matemáticas que dominan la física moderna (variedades seudoriemannianas,

variedades de Calabi-Yau, espacios de Hilbert, etc.) sean en realidad incoherentes.

Todas estas incertidumbres sobre la indecidibilidad e incoherencia se aplican tan solo a estructuras matemáticas con una cantidad infinita de elementos. En el capítulo anterior vimos que el problema de la medida que invade la cosmología moderna también se aplica tan solo a estructuras matemáticas con una cantidad infinita de elementos, lo que plantea un interrogante sugestivo: ¿son las infinidades, la indecidibilidad, la incoherencia potencial y el problema de la medida verdaderamente inherentes a la realidad física última, o son meros espejismos, productos de nuestros juegos con fuego y del empleo de herramientas matemáticas potentes que resultan más adecuadas para trabajar con ellas que para describir realmente nuestro universo? Más en concreto ¿hasta qué punto deben estar bien definidas las estructuras matemáticas para ser reales, es decir, para ser miembros del multiverso del nivel IV? Existe una gradación de opciones interesantes para determinar la aptitud de las estructuras:

- Ninguna estructura (es decir, la hipótesis del universo matemático es falsa).
- Estructuras finitas. Son trivialmente computables, puesto que todas sus relaciones se pueden definir mediante tablas de búsqueda finitas.
- Estructuras computables (cuyas relaciones se definen mediante cómputos que se detienen).
- Estructuras con relaciones definidas mediante cómputos sin la seguridad de que se detengan (pueden requerir una cantidad infinita de pasos), como el ejemplo *H*.
- Estructuras aún más generales, como las que implican un continuo y cuyos elementos habituales precisan una cantidad infinita de información para describirlos.

La hipótesis del universo computable

Una posibilidad interesante la constituye la hipótesis del universo computable (en adelante HUC), que tiene su límite en la opción 3 y que no deja lugar para estructuras más generales:

Hipótesis del universo computable (HUC): *La estructura matemática que se corresponde con nuestra realidad física exterior se define mediante funciones computables.*

Con esto nos referimos a que todas las relaciones (funciones) que definen la estructura matemática se pueden implementar como cómputos que se detienen con toda seguridad tras una cantidad finita de pasos. Si la HUC es falsa, entonces una hipótesis aún más conservadora la representa la hipótesis del universo finito (HUF); la opción 2 es su límite: nuestra realidad exterior es una estructura matemática finita.

Me resulta interesante que, tal como comentamos al final del capítulo anterior, los matemáticos hayan mantenido intensos debates sobre cuestiones relacionadas con todo esto sin hacer ninguna referencia a la física. Según la escuela finitista de matemáticas, a la que pertenecieron Leopold Kronecker, Hermann Weyl y Reuben Goodstein, un objeto matemático no existe a menos que se pueda construir a partir de números enteros en una cantidad finita de pasos. Esto nos lleva directamente a la opción 3.

De acuerdo con la HUC, la estructura matemática que constituye nuestra realidad física tiene la atractiva propiedad de ser computable y, por tanto, de estar bien definida en el sólido sentido de que todas sus relaciones se pueden computar. De ahí se deduce que ningún aspecto físico de nuestro universo sería incomputable/indecidible, lo que eliminaría el problema de que el trabajo de Church, Turing y Gödel de alguna manera volviera nuestro mundo incompleto o incoherente. No conozco con exactitud las propiedades de nuestra realidad física, pero estoy seguro de que esas propiedades existen en el sentido de que están bien definidas: ¡no tengo ninguna duda de que la naturaleza sabe lo que hace!

Muchos autores se han preguntado por qué nuestras leyes físicas parecen bastante simples. Por ejemplo, por qué el modelo estándar de la física de partículas tiene simetrías tan simples como las que llamamos $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, las cuales precisan tan solo los 32 parámetros del capítulo 10, cuando la mayoría de las alternativas son mucho más complicadas. Resulta tentador especular con que la HUC contribuye a esta relativa simplicidad imponiendo grandes límites a la complejidad de la naturaleza. Mediante la eliminación de todo el continuo, tal vez la HUC ayude también a reducir el paisaje inflacionario y a resolver el problema cosmológico de la medida que, tal como comentamos en el capítulo anterior, está vinculado en gran parte a la capacidad de un verdadero continuo para experimentar un estiramiento exponencial eterno, y producir una cantidad infinita de observadores.

Esta era la buena noticia. Pero, aunque la HUC posea rasgos atractivos, como garantizar que este universo está definido con rigor y tal vez mitigar el

problema cosmológico de la medida limitando lo que existe, también plantea grandes desafíos que deben resolverse.

Un primer problema relacionado con la HUC es que podría sonar a una renuncia al fundamento filosófico, porque en realidad reconoce que, aunque «ahí fuera» existan todas las estructuras matemáticas posibles, algunas tienen un estatus privilegiado. En cambio, yo estoy convencido de que si la HUC resultara ser correcta, sería más bien porque el resto del panorama matemático fuera una mera ilusión, esencialmente indefinido y sencillamente inexistente en cualquier sentido significativo.

Un desafío más inmediato es que el modelo estándar actual (y prácticamente todas las teorías fructíferas a lo largo de la historia) infringe la HUC, y no es nada obvio si existe una alternativa computable viable. El principal quebrantamiento de la HUC proviene de la incorporación del continuo, por lo común en forma de números reales o complejos, lo que ni siquiera permite efectuar la entrada de datos en un proceso de cálculo finito, porque en general se requiere especificar una cantidad infinita de bits. Incluso los planteamientos que intentan desterrar el clásico continuo del espaciotiempo volviéndolo discreto o cuántico, tienden a conservar variables continuas en otros aspectos de la teoría, como la intensidad del campo magnético o la amplitud de la función de onda cuántica.

Un tratamiento interesante de este desafío del continuo implica la sustitución de los números reales por una estructura matemática que emule el continuo pero permanezca computable como, por ejemplo, eso que en matemáticas recibe el nombre de números algebraicos. Otro enfoque que creo que vale la pena explorar consiste en descartar el continuo como algo fundamental y probar a recuperarlo como aproximación. Como he comentado, nunca hemos medido nada en física con más de 16 dígitos significativos, y tampoco se ha efectuado ningún experimento cuyo resultado dependa de la hipótesis de que exista un verdadero continuo, o que dependa de que la naturaleza compute algo incomputable. Es sorprendente que muchos de los modelos de continuo de la física matemática clásica (por ejemplo, las ecuaciones que describen ondas, difusión o flujo líquido) se reconozcan explícitamente como meras aproximaciones a una situación real que consiste en un conjunto discreto de átomos subyacente. La investigación en gravitación cuántica sugiere que hasta el espaciotiempo clásico se descompone a escalas muy pequeñas. Por tanto, no podemos estar seguros de que cantidades que seguimos tratando como continuas (como el espaciotiempo, las intensidades de campo y las amplitudes de la función de

onda cuántica) no sean meras aproximaciones de algo discreto. De hecho, determinadas estructuras computables discretas (en realidad, las finitas satisfacen la HUF) se aproximan tan bien a los modelos físicos del continuo, que los físicos las usamos para computar cosas en la práctica, lo que deja abierta la cuestión de si la estructura matemática de nuestro universo se parece más a las anteriores o a estas últimas. Algunos autores como Konrad Zuse, John Barrow, Jürgen Schmidhuber y Stephen Wolfram han llegado incluso a proponer que las leyes de la naturaleza son computables y finitas, como un autómata celular o una simulación por ordenador. (Nótese, sin embargo, que estas propuestas difieren de la HUC y de la HUF en que exigen que lo computable sea la *evolución temporal* de la estructura, y no su *descripción* [sus relaciones]).

Para rizar más el rizo, la física también ha brindado ejemplos de continuos (como los campos cuánticos) que producen una solución discreta (como una red cristalina), que a su vez se comporta como un medio continuo a gran escala, que a su vez tiene vibraciones que se comportan como partículas discretas llamadas fonones. Mi compañero del MIT Xiao-Gang Wen ha evidenciado que estas partículas «emergentes» se pueden comportar incluso como algunas partículas del modelo estándar, lo que abre la posibilidad de que tengamos múltiples capas de continuos efectivos y descripciones discretas en la superficie de lo que en última instancia sería una estructura computable discreta.

La estructura trascendente del nivel IV

Acabamos de ver la estrecha relación que mantienen las estructuras matemáticas con los cómputos, en tanto que las primeras se definen mediante las segundas. Por otra parte, los cómputos son meros casos especiales de estructuras matemáticas. Por ejemplo, el contenido de información (estado de memoria) de una computadora digital consiste en una cadena de bits, como por ejemplo «1001011100111001…», de una extensión inmensa pero finita, equivalente a algún número entero *n* enorme pero finito escrito en lenguaje binario. El procesamiento de información de una computadora es una regla determinista para transformar cada estado de memoria en otro (que se aplica una y otra vez), de modo que desde un punto de vista matemático, no es más que una función *f* iterada que aplica los números enteros consigo mismos: $n \rightarrow f(n) \rightarrow f(f(n))\ldots$ En otras palabras, hasta la simulación por computadora más sofisticada no es más que un caso especial de estructura matemática, y por tanto está incluida en el multiverso del nivel IV.

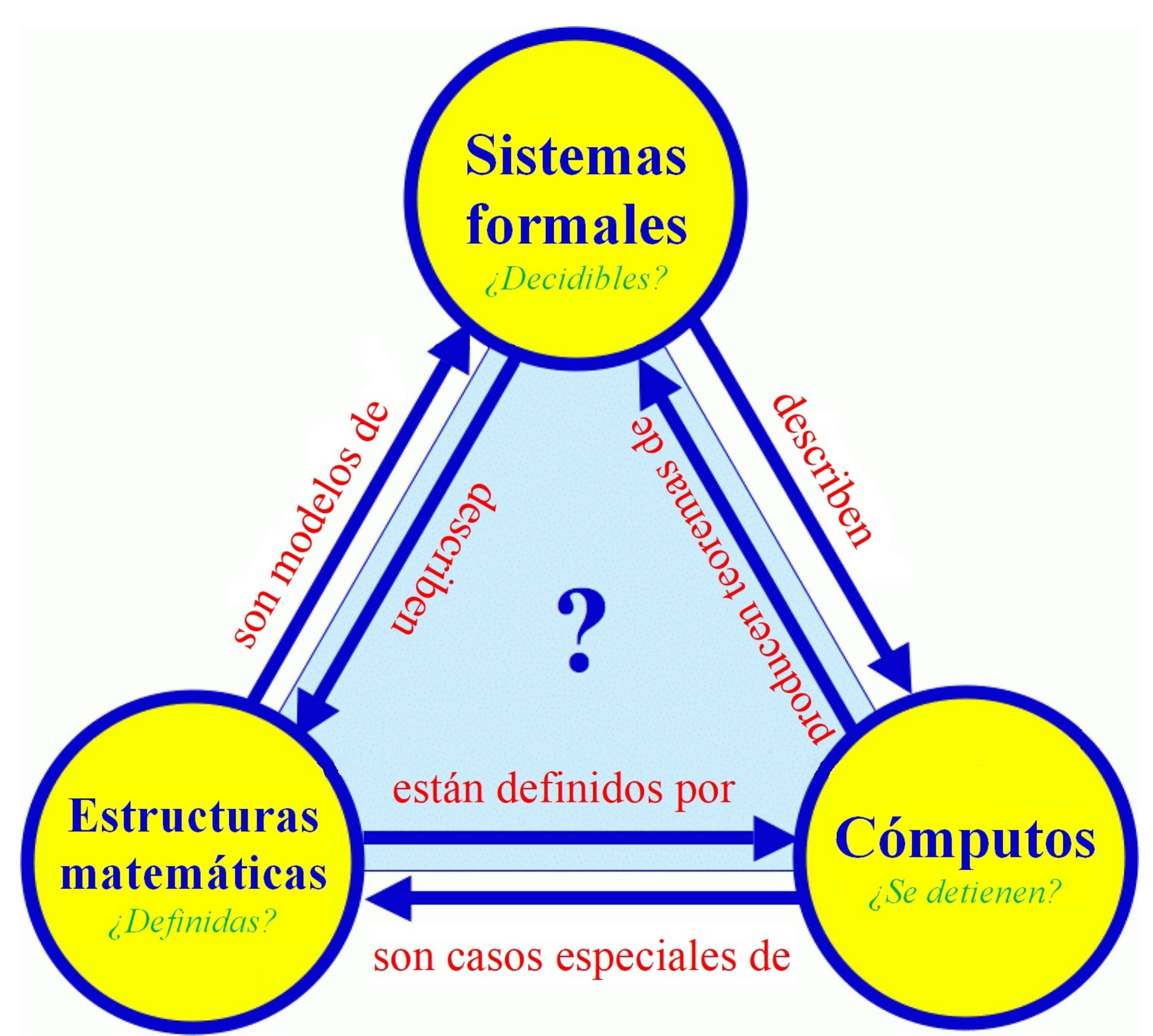


Figura 12.6: Las flechas indican las estrechas relaciones que se dan entre estructuras matemáticas, sistemas formales y cómputos. El signo de interrogación plantea si todos ellos serán aspectos de la misma estructura trascendente cuya naturaleza aún no hemos desentrañado en su totalidad.

La figura 12.6 ilustra que los cómputos y las estructuras matemáticas no solo están relacionados entre sí, sino también con los sistemas formales, los abstractos sistemas simbólicos de axiomas y reglas de deducción que se usan en matemáticas para demostrar teoremas sobre estructuras matemáticas. Las cajas de la figura 12.1 se corresponden con esos sistemas formales. Si un sistema formal describe una estructura matemática, en términos matemáticos se dice que la última es un *modelo* del primero. Es más, los cómputos pueden generar teoremas en sistemas formales (de hecho, para ciertas clases de sistemas formales, existen algoritmos capaces de computar todos los teoremas).

La figura 12.6 ilustra asimismo que caben problemas potenciales en los tres vértices del triángulo: las estructuras matemáticas pueden tener relaciones indefinidas; los sistemas formales pueden contener enunciados indecidibles; y

los cómputos pueden no acabar deteniéndose tras una cantidad finita de pasos. Las relaciones entre los tres vértices con sus complicaciones correspondientes se representan mediante seis flechas que se explican en más detalle en mi artículo sobre el universo matemático de 2007. Como cada flecha la estudian distintos especialistas de una variedad de disciplinas que van desde la lógica matemática hasta las ciencias de la computación, el estudio del triángulo como un todo resulta un tanto interdisciplinario y creo que merece más atención.

He introducido un signo de interrogación en el centro del triángulo para plantear que los tres vértices (estructuras matemáticas, sistemas formales y cómputos) tal vez no sean más que aspectos diferentes de una estructura trascendente subyacente cuya naturaleza aún no conocemos por completo. Esta estructura (quizá limitada a la parte definida/decidible/con detención de acuerdo con la HUC) existe «ahí fuera» de un modo libre de todo bagaje, y es tanto la totalidad de lo que tiene existencia matemática como la totalidad de lo que tiene existencia física.

Implicaciones del multiverso del nivel IV

En lo que llevamos de capítulo hemos defendido que la realidad física última es el multiverso del nivel IV, y hemos empezado a analizar sus propiedades *matemáticas*. Ahora indagaremos en sus propiedades *físicas* así como en otras implicaciones de la idea del nivel IV.

Simetrías y más allá

Si centráramos la atención en alguna estructura matemática particular de la lista maestra que nos sirve como atlas del multiverso del nivel IV ¿cómo deduciríamos qué propiedades físicas percibiría en él un observador con consciencia de sí mismo? En otras palabras, ¿cómo haría un matemático infinitamente inteligente para inferir, a partir de su definición matemática, la descripción física que llamamos «realidad consensuada» en el capítulo 9?[72]

En el capítulo 10 dijimos que el primer paso consistiría en calcular las simetrías de la estructura matemática. Las propiedades de simetría se cuentan entre las pocas clases de propiedades comunes a todas las estructuras matemáticas, y pueden manifestarse en forma de simetrías físicas ante los moradores de la estructura.

La cuestión de qué sería lo siguiente que habría que calcular a la hora de estudiar una estructura cualquiera es muy incierta, pero me sorprende que un estudio más profundo de las simetrías en la estructura matemática particular que habitamos nos haya conducido a una mina de oro de nuevos discernimientos. La matemática alemana Emmy Noether demostró en 1915 que cada simetría continua de nuestra estructura matemática conduce a una de las llamadas leyes de conservación de la física, las cuales garantizan que una cantidad se mantendrá constante, y por tanto tiene la permanencia necesaria para que observadores autoconscientes reparen en ella y le asignen un nombre «bagaje». Todas las cantidades conservadas mencionadas en el capítulo 7 se corresponden con esas simetrías: por ejemplo, la energía se corresponde con la simetría de traslación temporal (que las leyes de la física permanecen iguales en todo momento), la cantidad de movimiento se corresponde con la simetría de traslación espacial (que las leyes se mantienen iguales en todo lugar), el momento angular se corresponde con la simetría rotacional (que el espacio vacío no tiene una dirección «arriba» especial) y la carga eléctrica se corresponde con una cierta simetría de mecánica cuántica. El físico húngaro Eugene Wigner fue más allá para desvelar que estas simetrías también dictan todas las propiedades cuánticas que pueden tener las partículas, incluidas la masa y el espín. En otras palabras, entre ambos, Noether y Wigner evidenciaron que, al menos en nuestra estructura matemática, el estudio de las simetrías revela el «tipo» de materia que puede albergar. Tal como mencioné en el capítulo 7, a algunos de mis colegas físicos aficionados a la jerga matemática les gusta afirmar que una partícula no es más que «un elemento con una representación irreducible del grupo de simetría». Está claro que prácticamente todas las leyes de la física tienen su origen en simetrías, y el premio Nobel de física Philip Warren Anderson ha ido incluso más allá al declarar que «no exagero demasiado si digo que la física es el estudio de la simetría».

¿Por qué tienen tanta relevancia las simetrías en física? La HUM da como respuesta que nuestra realidad física tiene propiedades de simetría porque es una estructura matemática, y las estructuras matemáticas tienen propiedades de simetría. La cuestión más profunda de por qué la estructura particular que habitamos tiene tanta simetría se torna equivalente a plantearse por qué nos encontramos en esta estructura particular, y no en otra con menos simetría. Parte de la respuesta quizá radique en que las simetrías parecen ser más la regla que la excepción en las estructuras matemáticas, sobre todo en las grandes que no ocupan puestos demasiado bajos dentro de la lista maestra,

donde algoritmos simples definen relaciones para un número enorme de elementos precisamente porque todos ellos tienen propiedades en común. También podría deberse a un efecto de selección antrópica, tal como señaló el propio Wigner, porque es muy probable que la existencia de observadores capaces de detectar regularidades en el mundo que los rodea requiera simetrías, de modo que, dado que somos observadores, sería de esperar que nos halláramos en una estructura matemática altamente simétrica. Por ejemplo, imagine que intentáramos encontrarle el sentido a un mundo donde los experimentos nunca fueran repetibles, porque el resultado dependiera del lugar y el instante exactos en el que se realizaran. Si las piedras lanzadas al aire se precipitaran a veces hacia abajo, otras hacia arriba y otras hacia los lados, y el resto de cosas que nos rodean parecieran comportarse también de un modo aleatorio sin ningún patrón o regularidad apreciables, entonces tal vez no habría habido ninguna razón para desarrollar un cerebro.

La forma en que suele exponerse la física moderna trata las simetrías como una entrada y no como una salida. Por ejemplo, Einstein basó la relatividad especial en lo que se denomina simetría de Lorentz (el postulado de que no podemos saber si permanecemos quietos, porque todas las leyes de la física, incluidas las que rigen la velocidad de la luz, son las mismas para todos los observadores en movimiento uniforme). De manera semejante, una simetría llamada $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ se considera a menudo como un supuesto de partida para el modelo estándar de la física de partículas. Con la hipótesis del universo matemático se invierte la lógica: las simetrías no son un supuesto, sino tan solo propiedades de la estructura matemática que se pueden calcular a partir de su definición en la lista maestra.

El espejismo de las condiciones iniciales

Si se compara con la manera habitual en que se enseña física en el MIT, el multiverso del nivel IV brinda un punto de partida muy diferente para abordar esta disciplina, y eso obliga a reinterpretar la mayoría de los conceptos físicos tradicionales. Como acabamos de ver, algunos conceptos, como las simetrías, conservan su valor crucial. En cambio, otros conceptos, como las condiciones iniciales, la complejidad y la aleatoriedad, se reinterpretan como meras ilusiones existentes tan solo en la mente del observador y no en la realidad física exterior.

Examinemos en primer lugar las condiciones iniciales, con las que nos topamos brevemente en el capítulo 6. Nadie capta la idea tradicional de las condiciones iniciales mejor que Eugene Wigner: «Nuestro conocimiento del

mundo físico ha quedado dividido en dos categorías: las condiciones iniciales y las leyes de la naturaleza. El estado del mundo se describe mediante las condiciones iniciales. Estas son complejas y en ellas no se ha descubierto ninguna regularidad exacta. En cierto sentido, a los físicos no les interesan las condiciones iniciales, sino que dejan su estudio a los astrónomos, geólogos, geógrafos, etc.». En otras palabras, lo tradicional en física ha sido denominar «leyes» a las regularidades conocidas, e ignorar gran parte de lo que no entendemos como «condiciones iniciales». Las leyes permiten predecir cómo cambiarán con el tiempo esas condiciones, pero no aportan ninguna información sobre por qué empezaron del modo en que lo hicieron.

A diferencia de lo anterior, la hipótesis del universo matemático no deja ningún espacio a semejantes condiciones iniciales arbitrarias, y las elimina por completo como concepto fundamental. Esto se debe a que nuestra realidad física es una estructura matemática *completamente* especificada en todos los aspectos por su definición matemática dentro de la lista maestra. Cualquier supuesta teoría del todo que afirmara que todo «surgió» o se «creó» sin más en algún estado no especificado en su totalidad, constituiría una descripción incompleta y, por tanto, infringiría la HUM. Una estructura matemática no puede estar indefinida en parte. De modo que la física tradicional acepta las condiciones iniciales, mientras que la HUM las rechaza: ¿Qué se hace con esto?

El espejismo de la aleatoriedad

Esta exigencia de que todo esté definido obliga a la HUM a desterrar otro concepto que ha desempeñado un papel esencial dentro de la física: la aleatoriedad. Con independencia de que todo pueda *parecerle* aleatorio a un observador, en última instancia tiene que tratarse de una ilusión, algo que no exista a un nivel fundamental, porque no hay nada aleatorio en una estructura matemática. Sin embargo, los manuales de física que guardan las estanterías de mi despacho están llenos de esa palabra: se dice que las medidas cuánticas producen resultados aleatorios, y que el calor de una taza de café se debe al movimiento aleatorio de las moléculas que lo conforman. Una vez más, la física tradicional acepta algo que la HUM rechaza: ¿qué se hace con esto?

Los rompecabezas de las condiciones iniciales y de la aleatoriedad están relacionados y plantean una cuestión apremiante. De acuerdo con una estimación aproximada, se necesita casi un gúgol (10^{100}) de bits de información para especificar el estado real de cualquier partícula de nuestro universo en este instante preciso. ¿De dónde sale esa información? La

respuesta tradicional implica una combinación de condiciones iniciales y aleatoriedad: se necesitan muchos bits para describir cómo empezó nuestro universo, puesto que las leyes tradicionales de la física no lo especifican, y después se precisan bits adicionales para describir el resultado de varios procesos aleatorios ocurridos desde entonces hasta ahora. Pero como la HUM exige que todo esté especificado, y descarta tanto las condiciones iniciales como la aleatoriedad, ¿cómo se justifica toda esta información? Si la estructura matemática es lo bastante simple como para describirla con ecuaciones que caben en una camiseta, ¡a primera vista parece absolutamente imposible! Pero abordemos ahora estas cuestiones.

El espejismo de la complejidad

¿Cuánta información contiene en realidad nuestro universo? Como hemos comentado, el contenido de información (la complejidad algorítmica) de algo se corresponde con la cantidad de bits de su descripción autocontenida más breve. Para apreciar la sutileza de esto, veamos en primer lugar cuánta información contiene cada uno de los seis patrones que aparecen en la figura 12.7. A primera vista, los dos de la izquierda parecen muy semejantes, como patrones aleatorios de 128 × 128 = 16 384 píxeles minúsculos en blanco y negro. Esto induce a pensar que necesitamos unos 16 384 bits para describir cada uno de ellos, un bit para especificar el color de cada píxel. Pero, si bien lo más probable es que ese sea el caso del patrón de la izquierda superior, el cual creé con un generador cuántico de números aleatorios, el patrón que hay debajo de este oculta una simplicidad subyacente: ¡no es más que los dígitos binarios de la raíz cuadrada de dos! Esta sencilla descripción basta para calcular todo el patrón: $\sqrt{2} \approx 1{,}414213562\ldots$, que en lenguaje binario se escribe como 1,0100001010006110… Digamos, por ejemplo, que este patrón de ceros y unos se puede generar mediante un programa informático de 100 bits de tamaño. Entonces la aparente complejidad del patrón de la izquierda inferior es ilusoria: no tenemos ahí 16 384 bits de información, sino ¡tan solo 100!

Las cosas se vuelven más fascinantes cuando indagamos en la cantidad de información que hay en partes pequeñas de esos patrones. En la fila superior de la figura 12.7, las cosas son como cabría esperar: patrones más pequeños se tornan más simples y requieren menos información para describirlos: solo se necesita un bit para describir cada pequeño píxel blanco o negro. Pero en la fila inferior, ¡nos encontramos ante un ejemplo justo opuesto! En este caso, menos equivale a más, en el sentido de que el patrón del centro es *más*

complejo que el de la izquierda y precisa más bits para describirlo. Esto se debe a que ya no basta con decir únicamente que se corresponde con los dígitos binarios de √2: también hay que especificar en cuál de esos dígitos comienza el patrón, lo que en este caso precisa otros 14 bits de información. En resumen, vemos que *¡el todo puede contener menos información que la suma de sus partes y a veces incluso menos que una de sus partes!*

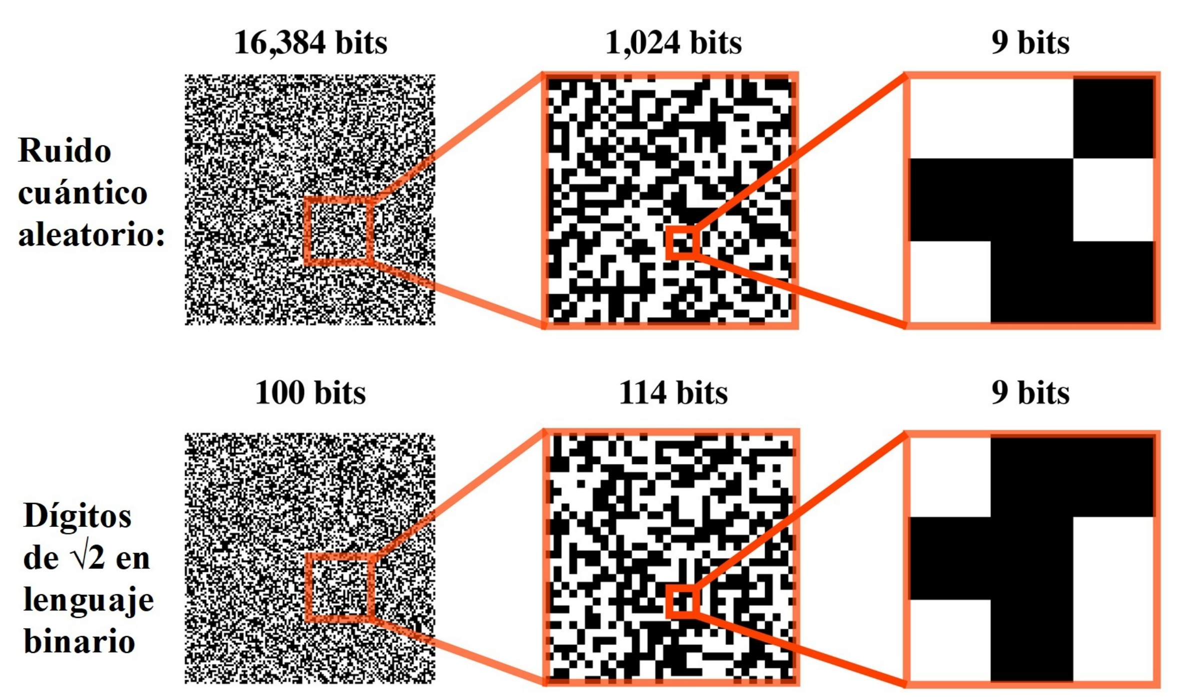


Figura 12.7: La complejidad de un patrón (cuántos bits de información se necesitan para describirlo) no siempre resulta evidente. El panel de la izquierda superior muestra 128 × 128 = 16 384 cuadrados pintados al azar de blanco y negro, por lo que normalmente no se pueden describir usando menos de 16 384 bits. Los fragmentos más pequeños de este patrón (centro y derecha superiores) consisten en menos cuadros al azar y, por tanto, precisan menos bits para describirlos. El patrón de la izquierda inferior, en cambio, se puede generar mediante un programa muy corto (de 100 bits, por decir algo), porque no es más que los dígitos de √2 en lenguaje binario (0 = cuadro negro, 1 = cuadro blanco). Para describir el patrón del centro inferior se necesitan 14 bits más, para especificar en qué dígito de √2 empieza. Por último, el patrón de la derecha inferior requiere 9 bits, igual que el que hay encima de él; el patrón es tan corto que no sirve para nada especificar que forma parte de √2.

Por último, cada uno de los dos patrones situados a la derecha en la figura 12.7 precisa 9 bits para describirlos. Usted y yo sabemos que el patrón de la derecha inferior se oculta entre los primeros 16 384 dígitos de √2, pero este dato deja de ser interesante o útil para un patrón tan pequeño: solo hay $2^9 = 512$ patrones posibles con una longitud de 9 bits, de modo que encontrará este patrón particular oculto en la mayoría de las cadenas aparentemente aleatorias formadas por miles de ceros y unos.

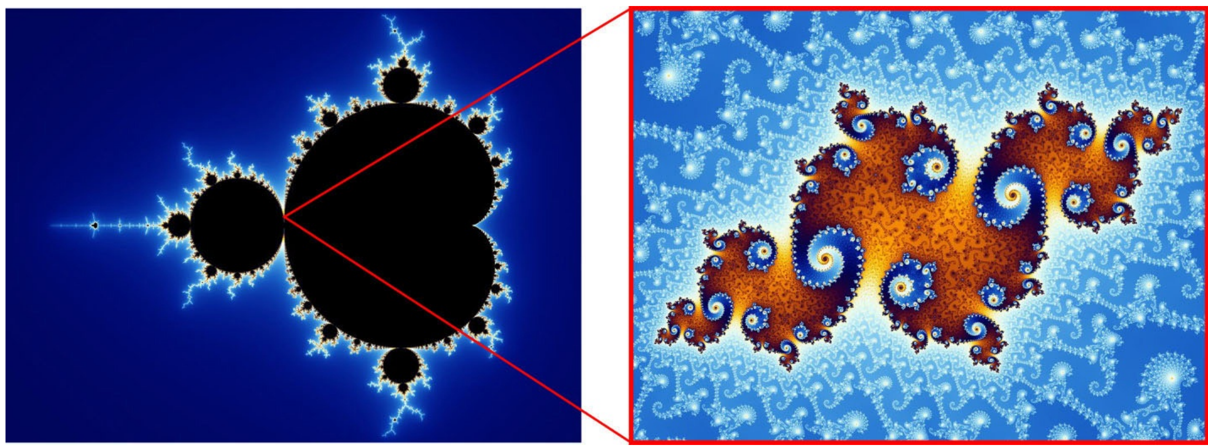


Figura 12.8: A pesar de su compleja apariencia con millones de píxeles de elaborados colores, el fractal de Mandelbrot (recuadro de la izquierda) posee una descripción muy simple: los puntos de la imagen se corresponden con lo que en matemáticas se denominan números complejos c, y los colores codifican con qué rapidez crece hacia el infinito el número complejo z cuando se parte de $z = 0$ y reiteradamente se eleva al cuadrado y se le suma c, es decir, al aplicarle repetidas veces la sencilla ecuación $z \to z^2 + c$. Paradójicamente, se necesita más información para describir la imagen de la derecha, aunque no sea más que una parte ampliada de la imagen de la izquierda: si dividimos el fractal de Mandelbrot en unos 100 billones de billones de pedazos, este es uno de ellos, y la información contenida en la imagen de la derecha se reduce esencialmente a indicar su posición dentro de la imagen grande, porque la manera más económica de especificar eso viene a ser «Fragmento 31415926535 897932384 del fractal de Mandelbrot».

La figura 12.8 muestra la preciosa estructura matemática conocida como fractal de Mandelbrot, y que ilustra aún mejor estas ideas. Posee la extraordinaria propiedad de revelar patrones intrincados a cualquier escala, por muy pequeña que esta sea, y aunque muchos de estos patrones parezcan iguales, no hay dos idénticos. ¿Cuánta complejidad hay en las dos imágenes que se muestran? Cada una de ellas contiene alrededor de un millón de píxeles que a su vez se representan mediante tres bytes de información (un byte equivale a ocho bits), lo que sugiere que cada imagen precisa unos cuantos megabytes para describirla. Sin embargo, la imagen de la izquierda se puede calcular, en realidad, con un programa de tan solo unos pocos cientos de bytes de longitud aplicando el empleo reiterado del sencillo cálculo $z^2 + c$ que se describe en el pie de la figura.

La imagen de la derecha también es simple, porque no es más que una parte minúscula de la de la izquierda. Pero es algo más compleja, porque se necesitan otros 8 bytes para especificar, con un número de 20 dígitos, cuál de las 10^{20} partes distintas es. Por tanto, vemos de nuevo que menos es más, en el sentido de que el contenido aparente de información aumenta cuando restringimos la atención a una parte pequeña del todo, con lo que se pierde la simetría y la simplicidad inherente a la totalidad de las partes consideradas en su conjunto. Como ejemplo aún más simple de esto, reparemos en que el

contenido de información algorítmica de un número cualquiera formado por un billón de dígitos es considerable, ya que el programa más breve para especificarlo no puede hacer nada mejor que limitarse a guardar todo ese billón de dígitos. En cambio, la lista de todos los números 1, 2, 3 … se puede generar mediante un programa informático bastante trivial, de modo que la complejidad del conjunto completo es menor que la de uno cualquiera de sus números.

Regresemos ahora a nuestro universo físico y el casi gúgol de bits que parece necesario para especificarlo. Algunos científicos, como Stephen Wolfram y Jürgen Schmidhuber, se han preguntado si gran parte de esa complejidad podría ser también un mero espejismo, igual que en el caso del fractal de Mandelbrot y el patrón de la izquierda inferior de la figura 12.7, y derivar de una regla matemática muy simple que aún esté por descubrir. Aunque me parece una idea elegante, no apostaría por ella: considero improbable que todos los números que caracterizan nuestro universo, desde los patrones en los mapas del fondo cósmico de microondas del *WMAP* hasta la posición de los granos de arena en una playa, puedan quedar reducidos a casi nada mediante un sencillo algoritmo de compresión de datos. De hecho, tal como vimos en el capítulo 5, la inflación cosmológica predice de manera explícita que las fluctuaciones primordiales cósmicas, las cuales originaron gran parte de esta información en última instancia, se distribuyen como números aleatorios para los que resulta imposible una compresión de datos tan espectacular.

Estas fluctuaciones primordiales especifican todas las maneras en que nuestro universo primigenio difería de un plasma perfectamente uniforme y fácil de describir. ¿Por qué se muestran tan aleatorios los patrones de las fluctuaciones primordiales cósmicas? En el capítulo 5 vimos que, de acuerdo con el modelo cosmológico estándar, la inflación genera *todos los patrones posibles* en distintas partes del espacio (en diferentes universos de todo el multiverso del nivel I), y como nosotros nos encontramos en una región muy común de ese multiverso, veremos un patrón aparentemente aleatorio sin ninguna regularidad oculta que nos ayude a comprimir la información. La situación se parece mucho a la de la hilera inferior de la figura 12.7, donde nuestro universo (que se correspondería con el panel de la derecha) equivale tan solo a una pequeña parte de apariencia aleatoria del multiverso del nivel I (que se correspondería con el panel de la izquierda) y su descripción simple. De hecho, si regresamos al capítulo 6, veremos que la figura 6.2 se vuelve equivalente a la fila inferior de la figura 12.7 con tan solo ampliarla para

incluir más de un gúgolplex de dígitos de √2 en lenguaje binario, y con ampliar el panel de la derecha para que contenga alrededor de un gúgol de bits, igual que nuestro universo. La mayoría de los matemáticos cree (aunque aún no se ha demostrado) que los dígitos de √2 se comportan como números aleatorios, de modo que en cualquier lugar aparece cualquier patrón posible, igual que los universos del multiverso del nivel 1 pueden tener unas condiciones iniciales cualesquiera. Esto significa que una secuencia de un gúgol de dígitos extraída de los dígitos de √2 no nos diría nada en absoluto sobre √2, sino tan solo acerca de la parte concreta de la secuencia de dígitos que estamos considerando. De igual manera, la observación de cualquier gúgol de bits de información aparentemente aleatorio y extraído de las fluctuaciones cósmicas primordiales generadas por la inflación solo nos revelará hacia qué lugar del vasto espacio posinflacionario estamos mirando.

Reinterpretación de las condiciones iniciales

Acabamos de plantearnos cómo interpretar nuestras condiciones iniciales, y hemos llegado a una respuesta demoledora: *no constituye una información fundamental sobre nuestra realidad física, sino sobre el lugar que ocupamos dentro de ella*. La inmensa complejidad que observamos es un espejismo en tanto que la realidad subyacente se describe con bastante sencillez, y lo que precisa casi un gúgol de bits para especificarlo no es más que nuestra dirección particular dentro del multiverso. En el capítulo 6 comentamos que nuestra Galaxia contiene muchos sistemas planetarios con distinto número de planetas, de modo que cuando decimos que el nuestro tiene ocho no estamos informando de nada fundamental sobre la Galaxia, sino sobre nuestra dirección galáctica. Como el multiverso del nivel I contiene otras tierras cuyos cielos exhiben toda la diversidad posible de patrones del fondo cósmico de microondas o de constelaciones estelares, la información contenida en el mapa del *WMAP* o una fotografía del asterismo de El Carro nos brindan, de igual modo, información sobre nuestra dirección dentro del multiverso. De manera análoga, las 32 constantes físicas del capítulo 10 nos hablan sobre el lugar que ocupamos dentro del multiverso del nivel II, si es que existe. Aunque pensábamos que toda esta información hacía referencia a nuestra realidad física, lo cierto es que habla sobre nosotros. La complejidad es un espejismo que existe tan solo en el ojo del observador.

La primera vez que se me ocurrieron estas ideas me dirigía en bicicleta al trabajo a través del Jardín Inglés de Múnich allá por 1995, y las publiqué en un artículo con el provocador título «¿Será que nuestro universo casi no

contiene ninguna información?». ¡Ahora sé que debí prescindir de la palabra *casi*! Y voy a explicar por qué. Nuestro multiverso del nivel III me recuerda más al fractal de Mandelbrot (figura 12.8) que al ejemplo de √2 (figura 12.7), porque sus piezas manifiestan mucha regularidad. Mientras que en los dígitos de √2 todos los patrones posibles aparecen con la misma frecuencia, muchos patrones (como fotografías de amistades, por ejemplo) no se dan en ningún lugar del fractal de Mandelbrot. Del mismo modo que la mayoría de los fragmentos del fractal de Mandelbrot parecen compartir cierto estilo artístico, dictado por la fórmula $z^2 + c$, la mayoría de los universos posinflacionarios del multiverso del nivel III comparten regularidades a lo largo de su desarrollo temporal derivadas de la mecánica cuántica. Con «casi ninguna información» me refería a la pequeña cantidad de información necesaria para describir esas regularidades, las cuales especifican la estructura matemática que encarna el multiverso del nivel III. Pero a la luz de la hipótesis del universo matemático, ni siquiera esa información nos desvela algo sobre la realidad física última, sino que tan solo nos habla sobre la dirección que nos corresponde dentro del multiverso del nivel IV.

Reinterpretación de la aleatoriedad

Vale, pues ahora que ya hemos averiguado cómo interpretar las condiciones iniciales, ¿qué hay de la aleatoriedad? También en este caso la respuesta radica en el multiverso. En el capítulo 8 vimos que la ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica, absolutamente determinista, puede generar una aleatoriedad aparente desde la perspectiva subjetiva de un observador en el multiverso del nivel III, y que el proceso principal era uno más general que no guarda ninguna relación con la mecánica cuántica: la clonación. En concreto, la aleatoriedad no es más que la manera en que se percibe el hecho de ser clonado: no es posible predecir qué será lo siguiente que se percibirá si va a haber dos copias de usted con percepciones diferentes. En el capítulo 8 vimos que la aleatoriedad aparente deriva de la clonación del observador en *algunos* casos. Ahora vemos que en realidad se debe a la clonación en *todos* los casos, puesto que la HUM descarta la aleatoriedad fundamental, la otra explicación lógica posible.

En otras palabras, mientras que las condiciones iniciales aparentemente arbitrarias están causadas por la existencia de múltiples universos, la aleatoriedad aparente se debe a la multiplicidad de copias de usted. Estas dos ideas se funden en una sola si consideramos esos universos paralelos que contienen copias subjetivamente indistinguibles de usted, de modo que hay

múltiples universos y múltiples ustedes. Entonces, cuando usted mide las condiciones iniciales de su universo, todas sus copias perciben esta información como aleatoria, y lo mismo da que interprete que esta información proviene de las condiciones iniciales o de la aleatoriedad, la información es la misma. Observando en qué universo se halla, usted sabrá qué copia de usted mismo está efectuando la observación.

La complejidad sugiere un multiverso

Hemos hablado mucho sobre la complejidad de este universo, pero ¿qué hay de la complejidad de nuestra estructura matemática?

La HUM no especifica si la complejidad de la estructura matemática a vista de pájaro es alta o baja, de modo que consideremos ambas posibilidades. Si fuera extremadamente alta, entonces está claro que nuestro empeño por especificarla está condenado al fracaso. En concreto, si para describir la estructura se precisan más bits que para describir el universo observable, ni siquiera podemos guardar la información referente a la estructura en nuestro universo; no cabría. Un ejemplo de teoría con una complejidad así de elevada lo representaría el modelo estándar con sus 32 parámetros del capítulo 10, especificados explícitamente como números reales, como $1/\alpha = 1/137{,}035999\ldots$, con una cantidad infinita de decimales carentes de patrón simplificador. Con que uno solo de esos parámetros exigiera el almacenamiento de una cantidad infinita de información, la estructura matemática ya tendría una complejidad infinita y sería imposible de especificar en la práctica.

La mayoría de los físicos abriga la esperanza de encontrar una teoría del todo mucho más simple que se pueda especificar mediante una cantidad de bits lo bastante reducida como para caber, si no en una camiseta, al menos en un libro, inmensamente inferior al casi un gúgol de bits necesarios para describir nuestro universo. Esa teoría simple tendrá que predecir un multiverso, con independencia de si la HUM es cierta o no. ¿Por qué? Pues porque esa teoría será, por definición, una descripción completa de la realidad: si no tiene suficientes bits para especificar por completo este universo, en lugar de eso tendrá que describir todas las combinaciones posibles de estrellas, granos de arena y cosas así, de modo que los bits adicionales que describen nuestro universo sencillamente codifiquen en qué universo estamos, tal como haría un código postal multiversal. En tal caso, la última línea de la dirección que figura en el sobre de la figura 12.5 sería

bastante corta, porque especificaría la teoría, pero las líneas superiores contendrían casi un gúgol de caracteres.

¿Vivimos dentro de una simulación?

Acabamos de ver que la hipótesis del universo matemático induce un cambio de perspectiva en muchas cuestiones fundamentales. Centrémonos ahora en otra de ellas: la de las realidades simuladas. Aunque hace tiempo que abunda en la ciencia ficción, la idea de que nuestra realidad exterior es alguna suerte de simulación por computadora ha cobrado relevancia con películas muy taquilleras, como *Matrix*. Científicos como Eric Drexler, Ray Kurzweil y Hans Moravec han asegurado que las mentes simuladas son tan posibles como inminentes, y algunos (por ejemplo, Frank Tipler, Nick Bostrom y Jürgen Schmidhuber) han llegado incluso a valorar la probabilidad de que ya haya ocurrido y de que seamos una simulación.

¿Por qué razón iba usted a pensar que es una simulación? Bueno, muchos libros de ciencia ficción han explorado escenarios donde la colonización futura del espacio transforme gran parte de la materia de nuestro universo en computadoras ultraavanzadas para simular cantidades ingentes de momentos del observador subjetivamente indistinguibles de los nuestros. Nick Bostrom y otros han afirmado que, en ese caso, lo más probable es que su momento actual del observador sea en realidad uno de los simulados, puesto que estos últimos abundan más. Sin embargo, creo que este argumento se autodestruye desde un punto de vista lógico: si el argumento fuera válido, las simulaciones que fueran copias indistinguibles de usted también podrían construir simulaciones, y eso implicaría que habría muchas más copias que son dobles simulaciones, y que lo más probable sería que usted fuera una simulación dentro de una simulación. Al repetir este argumento, se llega a la conclusión de que lo más probable es que usted sea una simulación dentro de una simulación dentro de una simulación, y así sucesivamente, hasta alcanzar una cantidad arbitraria de subniveles: *reductio ad absurdum*. Creo que el error lógico aparece en el primer paso: si usted asume que es una simulación, entonces, tal como subrayó Phillip Helbig, los recursos computacionales de su propio universo (simulado) son irrelevantes: lo que importa son los recursos computacionales del universo en el que está ocurriendo la simulación, sobre el cual no se sabe prácticamente nada.

Otros han defendido que a un nivel esencial es imposible que nuestra realidad sea una simulación. Seth Lloyd ha propuesto la posibilidad intermedia de que vivamos en una simulación analógica ejecutada por una computadora cuántica, aunque no sería una computadora diseñada por nadie, porque la estructura de la teoría cuántica de campos es matemáticamente equivalente a la de una computadora cuántica distribuida por el espacio. En una línea parecida, Konrad Zuse, John Barrow, Jürgen Schmidhuber, Stephen Wolfram y otros han explorado la idea de que las leyes de la física se correspondan con un cómputo clásico. Analicemos estas ideas dentro del contexto de la hipótesis del universo matemático.

La interpretación errónea del tiempo

Supongamos que nuestro universo fuera, en efecto, alguna forma de computación. Una idea equivocada que suele aparecer en la literatura sobre la simulación del universo es que la noción física que tenemos de un tiempo unidimensional se tiene que equiparar con el flujo unidimensional de cada paso de la computación. Más adelante explicaré que si la HUM es correcta, entonces no es necesario que las computaciones hagan que nuestro universo *evolucione*, sino que basta con que lo *describan* (que definan todas sus relaciones).

La tentación de equiparar cada paso temporal con cada paso computacional resulta incomprensible, dado que ambos forman una secuencia unidimensional donde (al menos en el caso no cuántico) el siguiente paso viene determinado por el estado actual. Sin embargo, esta tentación deriva de una descripción clásica y desfasada de la física: en la relatividad general de Einstein no existe ninguna variable temporal global, natural y bien definida, y mucho menos en la gravitación cuántica, donde se sabe que el tiempo emerge tan solo como una propiedad aproximada de ciertos subsistemas «reloj». De hecho, la vinculación del tiempo contemplado a vista de rana con el tiempo computacional es injustificada incluso dentro del contexto de la física clásica. El ritmo al que fluye el tiempo de acuerdo con la percepción de un observador inmerso en el universo simulado es completamente independiente del ritmo al que la computadora ejecuta la simulación, un detalle en el que hace hincapié Greg Egan en la novela de ciencia ficción *Ciudad permutación*[73]. Es más, tal como dijimos en el capítulo anterior y tal como enfatizó Einstein, sería más natural que oteáramos este universo, no a vista de rana, como un espacio tridimensional en el que pasan cosas, sino a vista de pájaro, como un espaciotiempo tetradimensional que simplemente es. De ahí que no fuera

necesario que un ordenador computara nada, bastaría con que almacenara todos los datos tetradimensionales, es decir, que codificara todas las propiedades de la estructura matemática que conforma nuestro universo. Cada fragmento individual de tiempo podría leerse, entonces, de manera secuencial si se deseara, y los habitantes del mundo «simulado» seguirían percibiéndolo como real, igual que en el caso en que tan solo se almacenan datos tridimensionales que evolucionan. En conclusión: *el papel de la computadora de simulación no consiste en computar la historia de nuestro universo, sino en especificarla*.

¿Y cómo se especifica? La manera en que se guardan los datos (el tipo de computadora, el formato de los datos, etc.) debería ser irrelevante, de modo que la medida en que los habitantes del universo simulado se perciban como reales debería ser independiente del método empleado para comprimir los datos. Las leyes físicas que hemos descubierto aportan medios excelentes para comprimir datos, porque de acuerdo con ellas basta con almacenar los datos iniciales en algún momento junto con las ecuaciones, y que un programa compute el futuro a partir de esos datos iniciales. Tal como señalé en las páginas 370−374, los datos iniciales podrían ser muy simples: los estados iniciales generalizados en la teoría cuántica de campos con nombres tan intimidatorios como *la función de onda de Hawking-Hartle* o *el vacío inflacionario de Bunch-Davies* tienen una complejidad algorítmica muy baja, puesto que se pueden definir en artículos científicos breves, pero la simulación de su evolución temporal no solo recrearía un universo como el nuestro, sino una extensa colección de universos paralelos en decoherencia. Por eso es creíble que nuestro universo (y hasta todo el multiverso del nivel III) se pudiera simular mediante un programa informático bastante reducido.

Un tipo distinto de computación

El ejemplo anterior hacía alusión a nuestra estructura matemática particular, con su mecánica cuántica y todo lo demás. En términos más generales, tal como hemos comentado ya, una descripción completa de una estructura matemática arbitraria es, por definición, una especificación de las relaciones que se dan entre sus elementos. Con anterioridad dentro de este capítulo vimos que para que esas relaciones estén bien definidas, todas las funciones deben ser *computables*: debe existir un programa informático capaz de computar las relaciones en una cantidad finita de pasos computacionales. De este modo, cada relación de la estructura matemática está definida por un

cómputo. En otras palabras, si nuestro mundo fuera una estructura matemática bien definida de acuerdo con lo dicho, entonces estaría inexorablemente ligado a la computación, si bien una computación de un tipo diferente a la que suele asociarse con la hipótesis de la simulación: esta computación no hace *evolucionar* nuestro universo, sino que lo *describe* sopesando sus relaciones.

¿Es necesario ejecutar una simulación?

Una comprensión más profunda de las relaciones entre estructuras matemáticas, sistemas formales y computaciones (el triángulo de la figura 12.6) arrojaría luz sobre muchas de las cuestiones espinosas que hemos encontrado a lo largo de este libro. Una de esas cuestiones es el problema de la medida que nos persiguió en el capítulo anterior, el cual se corresponde en esencia con el problema de cómo afrontar los fastidiosos infinitos y predecir probabilidades de lo que deberíamos observar. Por ejemplo, como cada simulación de universo se corresponde con una estructura matemática y, por tanto, ya existe en el multiverso del nivel IV ¿existirá «más» en algún sentido relevante si también se ejecuta en una computadora? Esta cuestión se complica con el hecho de que la inflación eterna predice un espacio infinito con una cantidad infinita de planetas, civilizaciones y computadoras, algunas de las cuales podrían estar ejecutando simulaciones de universos, y que el multiverso del nivel IV también incluye una cantidad infinita de estructuras matemáticas que pueden interpretarse como simulaciones de computadora.

El hecho de que este universo (junto con la totalidad del multiverso del nivel IV) se pueda simular mediante un programa informático bastante corto pone en tela de juicio que haya alguna diferencia ontológica entre «ejecutar» simulaciones o no. Si, tal como he explicado, la computadora solo debe describir la historia, y no computarla, entonces es probable que la descripción completa quepa en un solo lápiz de memoria, y no se necesite la potencia de una CPU. Parecería absurdo que la existencia de ese lápiz de memoria tuviera alguna repercusión en si el multiverso que describe existe «de verdad». Incluso en el caso de que importara la existencia del lápiz de memoria, algunos elementos de este multiverso contendrían un lápiz de memoria idéntico que mantendría de forma «recurrente» su propia existencia física. Esto no conduciría a un círculo vicioso como el problema de la gallina y el huevo, con relación a qué fue antes, si el lápiz o el multiverso, porque los elementos del multiverso son espacio tiempos tetradimensionales, mientras que la «creación», por supuesto, solo es un concepto con sentido *dentro* del espaciotiempo.

Entonces ¿somos una simulación? Según la HUM, nuestra realidad física es una estructura matemática y, como tal, existe con independencia de que aquí o en otro lugar del multiverso del nivel IV haya alguien que escriba un programa informático para simularla/describirla. La única incógnita que queda es, pues, si una simulación por computadora podría hacer que nuestra estructura matemática existiera aún más que ahora en algún sentido significativo. Si resolviéramos el problema de la medida, tal vez veríamos que simularla aumentaría ligeramente su medida, en una pequeña porción de la medida de la estructura matemática dentro de la cual esté simulada. Sospecho que en el mejor de los casos eso tendría unos efectos minúsculos, de modo que si me preguntaran si somos una simulación, ¡apostaría dinero a que no!

Relación entre la HUM, el multiverso del nivel IV y otras hipótesis

Diversos estudiosos han formulado una variedad interesante de propuestas sobre la realidad última que están a caballo entre la filosofía, la teoría de la información, las ciencias de la computación y la física, y como excelente repaso a las más recientes recomiendo las obras *La realidad oculta*, de Brian Greene, y *Theory of Nothing* [Teoría de la nada], de Russell Standish.

En el ámbito de la filosofía, la propuesta más cercana al multiverso del nivel IV la representa la teoría del *realismo modal* del filósofo ya fallecido David Lewis, la cual afirma que «todos los mundos posibles son tan reales como el mundo real». Su colega Robert Nozick, también fallecido, lanzó una propuesta similar llamada *principio de fecundidad*. Una crítica habitual del realismo modal sostiene que, como afirma que existen todos los universos imaginables, no efectúa ninguna predicción comprobable. El multiverso del nivel IV se puede interpretar como una realidad más pequeña y definida con mayor rigor, al reemplazar la expresión «todos los mundos posibles» de Lewis por la expresión «todas las estructuras matemáticas». El multiverso del nivel IV *no* implica que existan todos los universos imaginables. Los humanos concebimos muchas cosas que no se pueden definir en términos matemáticos y que, por tanto, no se corresponden con estructuras matemáticas. Los matemáticos publican artículos con demostraciones de existencia que evidencian la consistencia matemática de diversas descripciones de estructuras matemáticas justamente porque no es fácil conseguirlo ni es viable en todos los casos.

En el ámbito de las ciencias de la computación, las propuestas más parecidas son las que afirman que nuestra realidad física es alguna clase de simulación o simulaciones por computadora, tal como comentamos dentro de este mismo capítulo. La relación se ve con mucha claridad en la figura 12.6, donde estas dos ideas se corresponden con dos vértices distintos del triángulo: nuestra realidad es una computación de acuerdo con la hipótesis de la simulación, en oposición a la estructura matemática que es según la HUM. En la hipótesis de la simulación, las computaciones hacen *evolucionar* nuestro universo, pero en la HUM se limitan a *describirlo* mediante la valoración de sus relaciones. De acuerdo con las teorías del multiverso computacional exploradas por Jürgen Schmidhuber, Stephen Wolfram y otros, la *evolución del tiempo* debe ser computable, mientras que según la hipótesis del universo computable (HUC), lo que deber ser computable es la *descripción* (las relaciones). John Barrow y Roger Penrose han señalado que solo estructuras lo bastante complejas como para aplicarles el teorema de incompletitud de Gödel pueden contener observadores conscientes de sí mismos. Con anterioridad hemos visto que en cierto sentido la HUC postula justo lo contrario.

Comprobación del multiverso del nivel IV

Hemos afirmado que la hipótesis de la realidad exterior (HRE), que dice que existe una realidad física exterior completamente independiente de nosotros los humanos, implica la hipótesis del universo matemático (HUM), la cual dice que nuestra realidad física exterior es una estructura matemática y que a su vez implica la existencia del multiverso del nivel IV. Por tanto, la manera más directa de reforzar o debilitar los indicios que tenemos del multiverso del nivel IV consiste en seguir estudiando y comprobando la HRE. Aunque aún no se ha emitido un veredicto acerca de la HRE, creo que no me equivoco si digo que la mayoría de mis colegas físicos la suscriben, y que los éxitos recientes de los modelos estándar en la física de partículas y la cosmología apenas apuntan a que nuestra realidad física última, sea cual sea, gire de un modo fundamental en torno a nosotros, los humanos, y no pueda existir sin nosotros. Dicho esto, analicemos aun así dos maneras potenciales y más directas de comprobar la HUM y el multiverso del nivel IV.

La predicción de lo habitual

Tal como vimos en el capítulo 6, el descubrimiento de que un parámetro físico parezca estar ajustado con precisión para permitir la vida se puede interpretar como un indicio de un multiverso donde dicho parámetro adopta gran cantidad de valores, porque esta interpretación resta extrañeza al hecho de que exista un universo habitable como el nuestro, y predice que ahí es donde estaremos nosotros. En particular, vimos que uno de los indicios más sólidos del multiverso del nivel II radica en el ajuste fino observado en la densidad de la energía oscura. ¿Podría haber también algún signo de ajuste fino para el nivel IV, al menos en principio?

En 2005, mientras mi amigo Anthony Aguirre y yo dábamos un paseo al atardecer por los agradables jardines del Trinity College durante la celebración de un congreso, de pronto me di cuenta de que la respuesta es *sí*. Y esta es la razón.

Imagine que usted sale del coche de una amiga que lo ha llevado a visitar una ciudad que no conoce de nada, y que nota una acumulación confusa de señales en las calles (figura 12.9) que prohíbe aparcar en todas partes salvo en el lugar donde ha aparcado ella. La mujer le explica que, como parte de una campaña para reducir la contaminación, el nuevo alcalde ha ordenado colocar diez señales al azar en cada vía que prohíban aparcar en toda la calle tanto a la izquierda como a la derecha de la señal. Tras realizar algunos cálculos, usted repara en que este disparatado sistema aleatorio prohibirá aparcar en todos los sitios de cualquier calle, y solo dejará un 1 % de probabilidades de que quede un hueco permitido[74]; esto solo ocurre si todas las señales con flechas hacia la izquierda se sitúan a la izquierda de señales con flechas hacia la derecha.

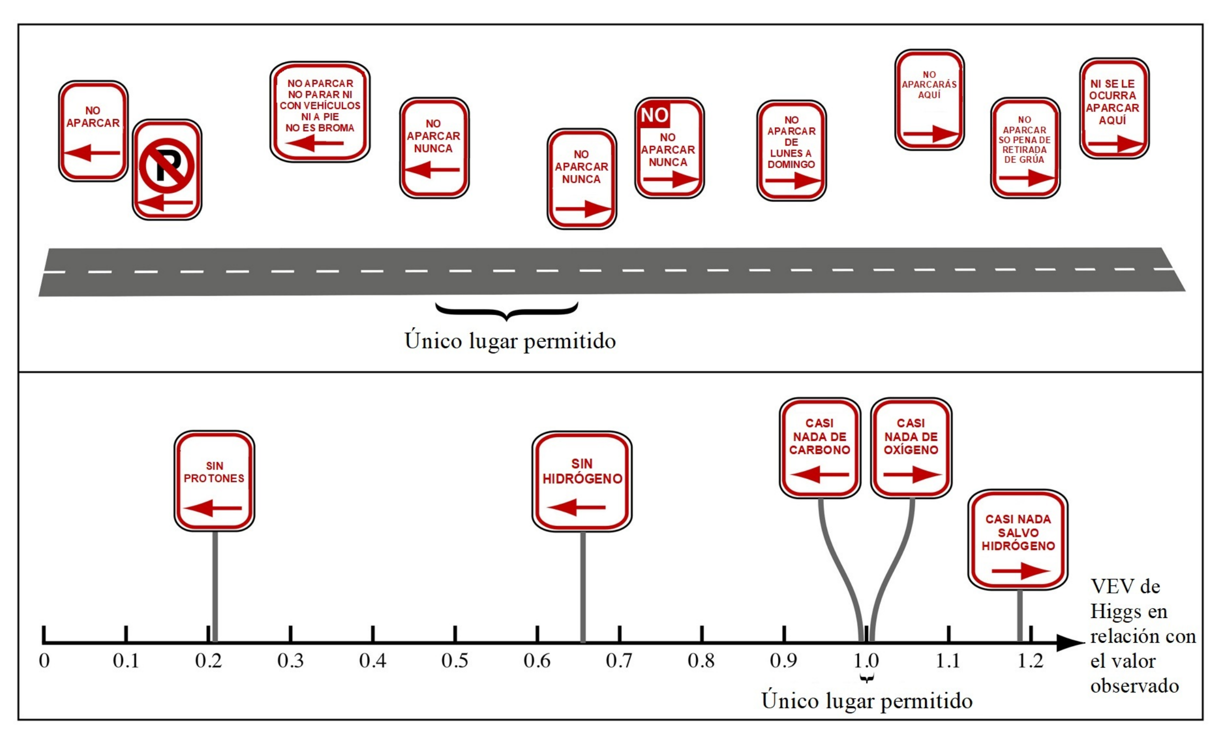


Figura 12.9: Si una calle tiene un montón de señales puestas al azar que prohíben aparcar a su izquierda o a su derecha, entonces es bastante improbable que se pueda aparcar en *algún* lugar de esa vía: solo se podrá si todas las señales con flechas que prohíben aparcar a su izquierda acaban a la izquierda de todas las señales que prohíben aparcar a su derecha, como en el ejemplo del panel superior de esta imagen. De manera similar, si un universo posee un parámetro físico que debe satisfacer un montón de restricciones para que se dé la vida (panel inferior), *a priori* parece improbable que haya algún valor para dicho parámetro que caiga dentro del rango habitable. Situaciones como las ilustradas aquí se pueden interpretar, pues, como indicios, respectivamente, de la existencia de muchas calles o de muchas estructuras matemáticas en un multiverso del nivel IV.

¿Qué conclusión sacaría usted de esto? ¿Pensaría que ha sido una feliz coincidencia? Si abomina las casualidades inexplicables como hacen los buenos científicos, entonces se inclinará hacia la única interpretación que no requiere un gran golpe de suerte: que esta extraña ciudad tiene muchas calles, seguramente unas 100 o más. Esto convierte en probable que se pueda aparcar en *varias* calles y, como su amiga conoce el lugar, no es de extrañar que ese fuera el aparcamiento donde eligió aparcar. Este ejemplo de ajuste fino difiere del del capítulo 6 en que lo que parece estar ajustado no es algo continuo, como la densidad de la energía oscura, sino algo discreto: todas las direcciones en las que apuntan las flechas hacia la derecha y hacia la izquierda crean una confabulación sorprendente.

Admito que el ejemplo de los aparcamientos es un poco ridículo, pero, tal como ilustra el panel inferior de la figura 12.9, observamos algo parecido en nuestro universo. El eje horizontal muestra un parámetro relacionado con la partícula de Higgs recién descubierta, y las últimas investigaciones de John Donoghue, Craig Hogan, Heinz Oberhummer y sus colaboradores han

revelado que, igual que ocurre con la densidad de la materia oscura, el valor parece ajustado con mucha precisión: es unos 16 órdenes de magnitud menor de lo esperable, pero si cambia un 1 % arriba o abajo supone una reducción drástica de la cantidad de carbono o de oxígeno que producen las estrellas. Si aumenta un 18 % implica una disminución radical de la fusión del hidrógeno en cualquier otro átomo en los interiores estelares, mientras que si se reduce en un 34 %, los átomos de hidrógeno decaen en neutrones porque el protón engulle el electrón. Si se reduce una quinta parte, hasta los protones aislados decaen en neutrones, lo que garantiza un universo carente por completo de átomos.

¿Cómo se interpreta esto? Bueno, en primer lugar, parece otra señal de un multiverso de nivel II en el que algunos parámetros físicos varían. Del mismo modo que esto explicaría por qué la densidad de la energía oscura es justo la necesaria para que se formen galaxias, también permite explicar con claridad por qué las propiedades de Higgs son las exactas para permitir la formación de átomos más complejos que el hidrógeno, y no es de extrañar que nosotros nos encontremos en uno de los escasos universos provistos tanto de átomos interesantes como de galaxias interesantes, puesto que la vida precisa al menos un mínimo de complejidad.

Pero la figura 12.9 plantea asimismo una segunda cuestión: ¿por qué las cinco flechas del panel inferior se alían para permitir *algún* tramo habitable en las propiedades de Higgs? Esto también podría deberse a un golpe de suerte: cinco flechas al azar permitirían algún tramo con un 19 % de probabilidades, de modo que basta con un poco de fortuna. Es más, el funcionamiento de la física nuclear dice que estas cinco flechas no son independientes, de modo que no debemos interpretar este ejemplo concreto de cinco flechas como un signo claro de nada. Sin embargo, es perfectamente posible que el avance en la investigación física no logre desvelar más ajustes finos de este tipo discreto donde, por ejemplo, 10 o más flechas se alíen para permitir una franja habitable para algún o algunos parámetros físicos[75]. Y, si eso ocurriera, cabría apelar al mismo argumento que usamos con el panel superior: que indica la existencia, no de otras calles, sino de otros *universos* con leyes de la física diferentes, lo que deriva en ¡requisitos muy distintos para la vida! En algunos casos, esos universos podrían existir en el multiverso del nivel II, en una región donde las mismas leyes fundamentales de la física den lugar a una fase distinta del espacio con otras leyes efectivas. En otros casos, en cambio, resultaría imposible, y entonces esos otros universos tendrían que obedecer otras leyes *fundamentales*, correspondientes a estructuras matemáticas

diferentes en el multiverso del nivel IV. En otras palabras, aunque actualmente carezcamos de observaciones directas que respalden el multiverso del nivel IV, es posible que consigamos alguna en el futuro.

La predicción de la regularidad matemática

Ya hemos hablado del conocido ensayo de 1960 de Wigner donde declaraba que «la inmensa utilidad de las matemáticas en las ciencias naturales es algo que raya en lo misterioso» y que «no hay ninguna explicación racional para ello». La hipótesis del universo matemático brinda esa explicación. Explica la utilidad de las matemáticas para describir el mundo físico como una consecuencia natural del hecho de que este último *es* una estructura matemática, y lo único que pasa es que nosotros vamos descubriéndolo bit a bit. Las diversas aproximaciones que ofrecen las teorías físicas tal vez sean buenas aproximaciones a ciertos aspectos de estructuras matemáticas más complejas. En otras palabras, las teorías que funcionan en la actualidad no consisten en matemáticas acercándose a la física, sino en matemáticas acercándose a las matemáticas.

Una de las predicciones clave de la hipótesis del universo matemático que sí admite una comprobación es que la investigación física revelará más regularidades matemáticas en la naturaleza. En 1931, Paul Dirac ya mencionó esta capacidad predictiva de la idea del universo matemático: «El método más eficaz para avanzar que podemos proponer hoy en día es emplear todos los recursos de las matemáticas puras para intentar perfeccionar y generalizar el formalismo que constituye los fundamentos existentes de la física teórica, y tras cada triunfo en esta dirección, intentar interpretar cada nuevo rasgo matemático en términos de entidades físicas».

¿Qué eficacia ha tenido esa capacidad predictiva hasta el momento presente? Dos milenios después de que los pitagóricos promulgaran la idea básica de un universo matemático, otros avances animaron a Galileo a describir la naturaleza como «un libro escrito en lenguaje matemático». A continuación se descubrieron otras regularidades matemáticas en muchos campos, desde los movimientos de los planetas hasta las propiedades de los átomos, lo que provocó las sorprendentes adhesiones de Dirac y Wigner. Después de aquello, los modelos estándar en física de partículas y cosmología desvelaron un nuevo orden matemático «inexplicable» de un alcance espectacular, desde el microcosmos de las partículas elementales hasta el macrocosmos del universo primigenio, lo que seguramente permitió que todas las medidas físicas realizadas se calcularan con éxito a partir de los 32

números que se relacionan en la tabla 10.1. No conozco ninguna otra explicación convincente para esta tendencia, salvo que el mundo físico sea en realidad enteramente matemático.

De cara al futuro caben dos posibilidades. Si estoy equivocado y la HUM es falsa, entonces la física acabará topándose con un obstáculo insalvable que no le permitirá avanzar más: ya no quedarán más regularidades matemáticas por descubrir aunque aún no dispongamos de una descripción completa de nuestra realidad física. Por ejemplo, una demostración convincente de la existencia de algo como una aleatoriedad fundamental en las leyes de la naturaleza (en oposición a la clonación determinista del observador que simplemente tiene una *percepción* subjetiva de la aleatoriedad) refutaría, por tanto, la HUM. Si, por el contrario, estoy en lo cierto, ¡la aspiración humana de desentrañar la realidad no hallará ningún obstáculo y solo estaremos limitados por la imaginación!

SUMARIO

- La hipótesis del universo matemático implica que la existencia matemática es igual a la existencia física.
- Esto significa que todas las estructuras que existen en el ámbito matemático existen también en el terreno físico, y conforman el multiverso del nivel IV.
- Los universos paralelos que hemos explorado forman una jerarquía anidada de cuatro niveles con una diversidad creciente: el nivel I (regiones del espacio distantes que no alcanzamos a observar), el nivel II (otras regiones posinflacionarias), el nivel III (otros lugares en el espacio cuántico de Hilbert) y el nivel IV (otras estructuras matemáticas).
- La vida inteligente no es nada común, en tanto que la mayoría de los niveles I, II y IV no son habitables.
- Para explorar el multiverso del nivel IV no se necesitan cohetes ni telescopios, bastan las computadoras y las ideas.
- Las estructuras matemáticas más simples se pueden relacionar por medio de una computadora que genere una especie de listín telefónico, de manera que cada una tenga su propio número único.
- Las estructuras matemáticas, los sistemas formales y las computaciones están íntimamente relacionados, lo que induce a pensar que todos ellos son aspectos de una misma estructura

trascendente cuya naturaleza aún no hemos desentrañado en su totalidad.

- La hipótesis del universo computable (HUC), por la cual la estructura matemática que conforma nuestra realidad física exterior está definida por funciones computables, tal vez sea necesaria para dotar de sentido la HUM, ya que, de no ser así, la incompletitud de Gödel y la incomputabilidad de Church-Turing se corresponderían con relaciones mal definidas en la estructura matemática.
- La hipótesis del universo finito (HUF), según la cual nuestra realidad física exterior es una estructura matemática finita, implica la HUC y elimina el peligro de que la realidad esté indefinida.
- La HUC/HUF tal vez ayude a resolver el problema de la medida y a explicar por qué es tan simple nuestro universo.
- La HUM implica la inexistencia de unas condiciones iniciales indefinidas: las condiciones iniciales no revelan nada sobre la realidad física, sino tan solo sobre la dirección que nos corresponde dentro del multiverso.
- La HUM implica que no hay aleatoriedad fundamental: la aleatoriedad es sencillamente la manera subjetiva en que se percibe la clonación.
- La HUM implica que la mayoría de la complejidad observada es una ilusión que existe tan solo en el ojo del observador, y no es más que información sobre la dirección que tenemos dentro del multiverso.
- Es posible que un conjunto de cosas resulte más fácil de describir que solo una de sus partes.
- Nuestro multiverso es más simple que nuestro universo en tanto que se puede describir con menos información, y el multiverso del nivel IV es el más simple de todos porque en esencia no exige la descripción de ninguna información.
- Lo más probable es que no vivamos en una simulación.
- En principio, la HUM es comprobable y falsable.

13
La vida, este universo y todo

Así es como acaba el mundo
No con una explosión sino con una exhalación.

T. S. Eliot, «Los hombres huecos»

El futuro no es lo que solía ser.

Yogi Berra



Figura 13.1: Cuando nos preguntamos de qué está hecho todo y enfocamos a escalas cada vez más pequeñas, nos encontramos con que los elementos constitutivos últimos de la materia son estructuras matemáticas, objetos cuyas características son propiedades matemáticas. Cuando nos planteamos las dimensiones de todo y ampliamos el campo de visión a escalas cada vez mayores, acabamos llegando al mismo sitio: al reino de las estructuras matemáticas, a un multiverso de nivel IV donde residen todas las estructuras matemáticas.

¿Qué tamaño tiene nuestra realidad física?

Es un honor para mí que usted, querido lector, me haya acompañado hasta este último capítulo a lo largo de este viaje de exploración de la realidad. Hemos llegado lejos, desde el macrocosmos que trasciende las galaxias hasta el microcosmos subatómico, y nos hemos encontrado con una realidad más

grandiosa que la que alcancé a vislumbrar en mis sueños infantiles más desenfrenados, con cuatro niveles distintos de universos paralelos.

¿Cómo casa todo esto entre sí? La figura 13.1 ilustra cómo lo concibo yo. En la primera parte del libro perseguimos responder qué dimensiones tiene todo lo que existe, y analizamos escalas cada vez mayores: residimos en un planeta, inmerso en una galaxia, dentro de un universo que creo que se encuentra en un multiverso de nivel I repleto de sosias, en el interior de un multiverso de nivel II más diverso aún, dentro de un multiverso de nivel III mecánico-cuántico, inmerso en un multiverso de nivel IV donde moran todas las estructuras matemáticas. En la segunda parte del libro nos planteamos de qué está hecho todo lo que existe, y analizamos escalas cada vez menores: estamos hechos de células, formadas por moléculas, consistentes en átomos, compuestos de partículas elementales que son estructuras puramente matemáticas en tanto que sus únicas características son propiedades matemáticas. Aunque aún no sabemos de qué se componen esas partículas, si es que están hechas de algo, la teoría de cuerdas y sus principales competidoras sugieren que cualquier elemento constitutivo más fundamental también será puramente matemático. En este sentido, aunque cada una de estas dos expediciones intelectuales partieran en direcciones opuestas, hacia lo grande y hacia lo pequeño, respectivamente, acabaron llegando al mismo lugar: al reino de las estructuras matemáticas. Aunque dicen que todos los caminos conducen a Roma, nuestras dos sendas hacia la realidad nos han llevado hasta las matemáticas. Esta elegante confluencia desvela que una estructura matemática puede contener otra en su interior, lo que explica todas las regularidades matemáticas que ha descubierto la física como aspectos o aproximaciones de la grandiosa estructura matemática que es nuestra realidad exterior completa. A las escalas más grandes y más pequeñas, el tejido matemático de la realidad se torna evidente, mientras que es fácil de pasar por alto a las escalas intermedias de las que solemos ser conscientes los seres humanos[76].

Argumentos a favor de una realidad más pequeña

He esbozado la imagen de nuestra realidad física última tal como la veo. Esta realidad me parece de una belleza sobrecogedora y de una grandiosidad impresionante. Pero ¿es real o cabría la posibilidad de que esa imagen fuera ilusoria, y gran parte de la grandeza no fuera más que un espejismo? ¿De verdad vivimos en un multiverso, o es esto una pregunta tonta, intolerable dentro de la ciencia? He aquí mi humilde opinión.

Las ideas relacionadas con el multiverso han tenido tradicionalmente poco respaldo en general: hemos visto que Giordano Bruno y su multiverso de espacio infinito ardieron en la hoguera en el año 1600, y Hugh Everett y su multiverso cuántico se quemaron dentro del mercado laboral de la física en 1957. Y, como he comentado ya, yo mismo noté el calor en mis propias carnes cuando colegas situados por encima de mí plantearon que mis publicaciones en relación con el multiverso eran disparates y que arruinarían mi carrera científica. Sin embargo, en los últimos años se ha producido un cambio radical. Ahora los universos paralelos hacen furor, y asoman en libros, películas y hasta chistes: «Aprobaste el examen en muchos universos paralelos, pero no en este».

Este tratamiento abierto de las ideas no ha traído un consenso entre científicos, pero ha convertido el debate sobre el multiverso en algo mucho más matizado y, en mi opinión, mucho más interesante, puesto que los científicos han dejado de gritarse consignas los unos a los otros, y se esfuerzan de verdad por comprender puntos de vista contrapuestos. Un bonito ejemplo lo encontramos en un artículo reciente contrario al multiverso de George Ellis, uno de los iniciadores de la relatividad, publicado en *Scientific American* y cuya lectura considero más que recomendable (consúltese **http://tinyurl.com/antiverse**).

Tal como dijimos en el capítulo 6, empleamos el término *este* o *nuestro universo* para referirnos a la región esférica de espacio desde la que la luz ha tenido tiempo de alcanzarnos durante los catorce mil millones de años transcurridos desde la Gran Explosión. Cuando hablamos de universos paralelos, distinguimos entre cuatro niveles diferentes: el nivel I (otras regiones como esta pero lejanas en el espacio, donde las leyes visibles de la física son las mismas, pero donde el devenir de la historia es distinto porque las cosas comenzaron de otro modo), el nivel II (regiones del espacio donde hasta las leyes perceptibles de la física son diferentes), el nivel III (mundos paralelos en otros lugares del espacio de Hilbert donde actúa la realidad cuántica) y el nivel IV (realidades desconectadas por completo y gobernadas por ecuaciones matemáticas diferentes). En su análisis, George Ellis clasifica muchos argumentos a favor de estos niveles de multiverso, y manifiesta que todos ellos tienen problemas. Resumo a continuación sus principales argumentos en contra del multiverso:

1. La inflación podría ser un error (o no ser eterna).
2. La mecánica cuántica podría ser un error (o no ser unitaria).

3. La teoría de cuerdas podría ser un error (o no tener múltiples soluciones).
4. Los multiversos podrían ser infalsables.
5. Algunos de los signos que se han aducido como indicios de multiverso son dudosos.
6. Los argumentos basados en el ajuste fino tal vez presupongan demasiado.
7. Es un terreno resbaladizo que podría conducir a multiversos aún mayores.

(En realidad, George no menciona el segundo argumento en su artículo, pero lo he añadido aquí porque creo que lo habría hecho si el editor le hubiera permitido extenderse más de seis páginas).

¿Qué opino sobre esta crítica? Por extraño que parezca, estoy de acuerdo con las siete afirmaciones y, sin embargo, ¡seguiría apostando los ahorros de mi vida sin dudarlo a que existe un multiverso!

Empecemos por los cuatro primeros puntos. Como vimos en el capítulo 6, la inflación produce de manera natural el multiverso del nivel I, y si añadimos la teoría de cuerdas y su escenario de soluciones posibles, también se obtiene el nivel II. Como vimos en el capítulo 8, la mecánica cuántica en su variante matemática más simple carente de colapso («unitaria») da lugar al nivel III. De modo que si se descartan estas teorías, los principales indicios de estos multiversos se desploman. Recordemos que: *los universos paralelos no son una teoría, son predicciones de ciertas teorías*.

En mi opinión, la clave está en que si las teorías son científicas, la evaluación y el análisis de sus consecuencias también es ciencia legítima, aun cuando impliquen entidades no observables. Para que una teoría sea falsable, no es necesario observar y comprobar todas sus predicciones, sino tan solo una de ellas. Por tanto, mi respuesta a la cuarta crítica es que lo comprobable de manera científica son las teorías matemáticas, y no necesariamente sus implicaciones, y con eso ya es suficiente. Tal como dijimos en el capítulo 6, como la teoría de la relatividad general de Einstein predijo muchas cosas observables, también nos tomamos en serio sus predicciones sobre lo que no podemos observar (por ejemplo, lo que ocurre dentro de los agujeros negros). De manera análoga, si nos impresionan las predicciones atinadas de la inflación o de la mecánica cuántica, entonces también debemos tomarnos en serio el resto de sus predicciones, incluidos los multiversos del nivel I y del nivel III. George llega a mencionar incluso la posibilidad de que la inflación

eterna se descarte algún día: para mí eso no es más que un alegato de que la inflación eterna es una teoría científica.

En cuanto a la teoría de cuerdas, es cierto que no ha llegado tan lejos como la inflación y la mecánica cuántica a la hora de consolidarse como una teoría científica verificable. No obstante, sospecho que seguiremos anclados a un multiverso de nivel II aunque la teoría de cuerdas resultara ser una pista falsa. Es bastante habitual que las ecuaciones matemáticas tengan múltiples soluciones y, como eso es lo que ocurre con las ecuaciones fundamentales que describen nuestra realidad, la inflación eterna crea de manera genérica regiones inmensas de espacio que cumplen físicamente cada una de esas soluciones, tal como vimos en el capítulo 6. Por ejemplo, las ecuaciones que rigen las moléculas de agua, que no mantienen ninguna relación con la teoría de cuerdas, permiten las tres soluciones correspondientes al vapor de agua, el agua líquida y el hielo, y si el propio espacio existiera también en distintos estados, entonces la inflación tendería a producirlos todos.

George enumera una serie de observaciones, cuando menos dudosas, que supuestamente respaldan las teorías del multiverso, como los signos de que ciertas constantes de la naturaleza no son constantes en realidad, y los indicios en la radiación del fondo cósmico de microondas de colisiones con otros universos o con espacios conectados de manera extraña. Comparto por completo el escepticismo ante estas afirmaciones. No obstante, en todos esos casos la controversia proviene del análisis de los datos, igual que sucedió en 1989 con la debacle de la fusión fría. Para mí, el mero hecho de que los científicos estén efectuando estas mediciones y discutiendo los detalles de los datos es otro signo de que seguimos dentro del ámbito científico: ¡eso es precisamente lo que diferencia una controversia científica de una no científica!

En el capítulo 6 vimos que nuestro universo se revela ajustado con una precisión sorprendente para la vida, de tal modo que si alteráramos mínimamente muchas de las constantes que hemos detectado en la naturaleza, la vida tal como la conocemos sería imposible. ¿Por qué? Si hubiera un multiverso de nivel II en el que esas «constantes» adoptaran todos los valores posibles, no sería raro que residiéramos en uno de los pocos universos que son habitables, del mismo modo que no es de extrañar que vivamos en la Tierra en lugar de hacerlo en Mercurio o Neptuno. George censura que haya que asumir una teoría del multiverso para llegar a esta conclusión, pero no es así como se comprueban las teorías científicas: se parte de su veracidad, se deducen las consecuencias, y se descarta la teoría si las predicciones no

concuerdan con las observaciones. Algunos ajustes son tan extremos que resultan bastante bochornosos; por ejemplo, ya vimos que hay que afinar la energía oscura con unos 123 decimales para lograr galaxias habitables. Considero que una coincidencia inexplicable puede ser un signo revelador de una laguna en nuestros conocimientos científicos. Desecharlo diciendo «¡Tuvimos suerte, no hay que buscar otra explicación!», no solo es inaceptable, sino también equivalente a ignorar una posible clave crucial.

Georges sostiene que si tomamos en serio que ocurre todo lo que puede ocurrir, nos deslizaremos por una pendiente resbaladiza hacia multiversos aún mayores, como el del nivel IV. Como ese es mi nivel de multiverso preferido y soy uno de los poquísimos que lo defienden, ¡estoy encantado de dejarme caer por esa pendiente!

George también menciona que los multiversos tal vez sean contrarios a la navaja de Occam porque introducen complicaciones innecesarias. Como físico teórico que soy, valoro la elegancia y la simplicidad de una teoría no por su ontología, sino por la elegancia y la simplicidad de sus ecuaciones matemáticas, y me resulta muy sorprendente que las teorías más simples desde un punto de vista matemático tiendan a dar como resultado multiversos. Ya hemos comprobado lo difícil que es desarrollar una teoría que reproduzca con exactitud el universo que vemos y nada más.

Por último, hay un argumento en contra del multiverso que alabo que George haya eludido, pero que en mi opinión es el más convincente de todos para la mayoría de la gente: los universos paralelos parecen demasiado raros para ser reales. Pero, como dijimos en el capítulo 1, eso es justo lo esperable: la evolución nos dotó de intuición tan solo para esos aspectos cotidianos de la física relevantes para la supervivencia de nuestros ancestros lejanos, lo que permite predecir que siempre que usemos la tecnología para escudriñar la realidad a escalas distintas a la humana, la intuición fracasará. Lo hemos comprobado una y otra vez con las características contrarias a la intuición de la teoría de la relatividad, la mecánica cuántica, etc., y lo esperable es que, sea cual sea la teoría física que acabe revelándose como definitiva, nos extrañará aún más.

Argumentos a favor de una realidad más grande

Tras repasar los argumentos en contra del multiverso, analicemos ahora con más detenimiento los argumentos a favor del mismo. Me dispongo a defender que todas las cuestiones controvertidas se desvanecen si aceptamos la hipótesis de la realidad exterior del capítulo 10: *Existe una realidad física*

exterior completamente independiente de nosotros, los humanos. Supongamos que esta hipótesis es cierta. En tal caso, la mayor parte de las críticas al multiverso se basa en alguna combinación de los tres dudosos supuestos que siguen:

Supuesto de la omnivisión: *La realidad física debe ser tal que al menos un observador pueda en principio observarla en su totalidad.*

Supuesto de la realidad pedagógica: *La realidad física debe ser tal que lodos los observadores humanos bien informados tengan la percepción de que la entienden de forma intuitiva.*

Supuesto anticopia: *Ningún proceso físico puede copiar observadores o crear observadores indistinguibles en cuanto a percepciones subjetivas.*

Los supuestos 1 y 2 parecen inspirados por poco más que la arrogancia humana. El supuesto de la omnivisión redefine en la práctica la palabra *existe* para convertirla en sinónima de lo que es observable para los humanos, lo que nos asemeja a avestruces con la cabeza hundida en la arena. Por lo común, quienes insisten en el supuesto de la realidad pedagógica habrán renegado de nociones de la infancia tan familiares y reconfortantes como Papá Noel, el espacio euclídeo, el ratoncito Pérez y el creacionismo, pero ¿han trabajado lo suficiente para liberarse de nociones también familiares y reconfortantes que tenemos más arraigadas? En mi opinión, el trabajo del científico consiste en intentar desvelar cómo funciona el mundo, no en decirle cómo debe funcionar basándose en sus prejuicios filosóficos.

Si el supuesto de la omnivisión es falso, entonces por definición hay cosas que existen aunque no sean observables incluso en principio. Como la definición humana de universo incluye todo lo que en principio es observable, esto significa que nuestro universo no es todo lo que existe, de modo que vivimos en un multiverso. Si el supuesto de la realidad pedagógica es falso, entonces la objeción de que los multiversos son demasiado extraños carece de lógica. Si el supuesto anticopia es falso, entonces no hay ninguna razón fundamental para que no pueda haber copias nuestras en otro lugar de la realidad exterior, de hecho, en los capítulos 6 y 8 hemos visto que tanto la inflación eterna como la mecánica cuántica libre de colapso aportan mecanismos para crearlas.

Más aún, en el capítulo 10 afirmamos que la hipótesis de la realidad exterior implica la hipótesis del universo matemático: que nuestra realidad física exterior es una estructura matemática. En el capítulo 12 vimos que esto implica a su vez el multiverso del nivel IV, el cual contiene en sí mismo todos los demás niveles de multiverso. En otras palabras, básicamente nos quedamos adheridos a todos esos universos paralelos en cuanto aceptamos que hay una realidad exterior independiente de nosotros.

En resumen, a lo largo de este libro hemos visto que la imagen que tiene la humanidad de sí misma ha evolucionado. Los humanos hemos tendido durante mucho tiempo a la soberbia con la arrogancia de creernos el centro de la escena, de forma que todo giraba a nuestro alrededor, pero en repetidas ocasiones hemos comprobado nuestro error: somos nosotros los que giramos alrededor del Sol, el cual gira a su vez alrededor del centro de una galaxia entre una cantidad incontable de otras muchas dentro de un universo que quizá resulte estar a su vez dentro de una jerarquía de multiversos de cuatro niveles. Espero que esto nos infunda una humildad aún mayor. Sin embargo, a la vez que hemos sobreestimado nuestras capacidades físicas dentro del grandioso esquema de las cosas, ¡los humanos también hemos subestimado nuestras capacidades mentales! Nuestros ancestros pensaron que estaban pegados para siempre a la tierra, y que jamás entenderían de verdad la naturaleza de las estrellas y lo que hay más allá de ellas. Después repararon en lo lejos que podían llegar sin volar al espacio en el estudio de los objetos celestes, dejando volar la mente humana. Gracias a los descubrimientos físicos conseguimos un discernimiento cada vez más profundo de la mismísima naturaleza de la realidad. Hemos descubierto que habitamos una realidad mucho más grandiosa que la que alcanzaron a soñar nuestros ancestros, y esto significa que nuestro potencial futuro para la vida es mucho mayor de lo que creíamos. Con unos recursos físicos casi ilimitados, será nuestra inventiva futura lo que establecerá la diferencia; de modo que tenemos el destino en nuestras manos.

El futuro de la física

Si estoy equivocado y la hipótesis del universo matemático es falsa, significa que la física fundamental está condenada a toparse en algún momento con un obstáculo más allá del cual no podremos seguir conociendo mejor nuestra realidad física porque no tiene una descripción matemática. Si estoy en lo

cierto, entonces no habrá obstáculo alguno, y en principio todo es comprensible para nosotros. Creo que sería fantástico porque entonces el único límite será nuestra propia imaginación.

Nuestra imaginación y nuestra disposición a esforzarnos para ser más específicos. Tal como dije en el capítulo 10, la respuesta que dio Douglas Adams a su gran cuestión de la vida, el universo y todo, a duras penas fue una respuesta que resolviera todas las preguntas. De igual manera, la respuesta que propongo para el interrogante de la naturaleza última de la realidad (que «toda ella es matemáticas», o más en concreto, que «es el multiverso del nivel IV») deja sin solucionar la mayoría de las grandes cuestiones que nos ocupan desde siempre. En lugar de resolverse, la mayoría de las preguntas experimenta una reformulación. Por ejemplo, «¿cuáles son las ecuaciones de la gravitación cuántica?», se transforma en «¿en qué lugar del multiverso del nivel IV nos encontramos?», una cuestión que parece tan difícil de responder como la original. De modo que la pregunta última sobre la realidad física cambiaría. Abandonaríamos el interrogante de qué ecuaciones matemáticas específicas describen toda la realidad, por desacertado, y en su lugar nos plantearíamos cómo calcular la imagen a vista de rana que tenemos de este universo (nuestras observaciones) a partir de la vista de pájaro. Eso concretaría si hemos descubierto la verdadera estructura de nuestro universo particular, y nos ayudaría a desentrañar qué rincón del cosmos matemático nos aloja.

El hecho de que las cuestiones fundamentales resulten más fáciles de responder que las menos fundamentales es muy habitual en física: si encontráramos las ecuaciones correctas para describir la gravitación cuántica, lograríamos una explicación más profunda de lo que son el espacio, el tiempo y la materia, pero no nos ayudarían a desarrollar modelos más precisos del cambio climático global, a pesar de que en principio explican toda la física relevante de la meteorología. El diablo está en los detalles, y calcular esos detalles requiere con frecuencia una labor dura bastante independiente de la teoría subyacente en última instancia.

En esta línea, dedicaremos el resto del libro a explorar algunas de las grandes cuestiones que nos alejan cada vez más de la física fundamental y nos acercan poco a poco a casa. Como las primeras partes del libro se centraron sobre todo en el pasado, parece pertinente acabar este viaje mirando hacia el futuro.

El futuro de este universo: ¿cómo acabará?

Si la hipótesis del universo matemático es correcta, entonces no hay mucho que decir sobre el futuro de nuestra realidad física en su conjunto: como existe fuera del espacio y el tiempo, no podrá acabar o desaparecer más de lo que puede ser creada o cambiar. Sin embargo, si nos quedamos cerca de casa y ponemos el foco en la estructura matemática particular que habitamos, la cual alberga en su interior el espacio y el tiempo, entonces las cosas se tornan mucho más interesantes. Aquí, en nuestro vecindario, las cosas son de tal modo que parecen cambiar contempladas desde el punto de vista privilegiado de observadores como nosotros, y es natural preguntarse qué pasará al final.

Entonces ¿cómo acabará nuestro universo cuando transcurran varios miles de millones de años? Tengo cinco hipótesis para nuestro futuro apocalipsis cósmico (o «cosmocalipsis»), ilustradas en la figura 13.2 y sintetizadas en la tabla 13.1: El Gran Frío, la Gran Implosión, la Gran Fuga, la Gran Disgregación y Burbujas Mortales.

Como vimos en el capítulo 3, este universo lleva expandiéndose unos catorce mil millones de años. El Gran Frío *(Big Chill)* se da si el universo sigue expandiéndose para siempre y diluye el cosmos hasta convertirlo en un lugar gélido, oscuro e inerte a la larga. La considero la opción de T. S. Eliot: «Así es como acaba el mundo / No con una explosión, sino con una exhalación». Si, como Robert Frost, usted prefiere que el mundo acabe envuelto en llamas y no en hielo, entonces cruce los dedos para que ocurra la Gran Implosión *(Big Crunch)*, donde la expansión cósmica acabará invirtiéndose y todo volverá a juntarse de nuevo en un colapso cataclísmico semejante a una Gran Explosión marcha atrás. Por último, la Gran Fuga *(Big Rip)* es como un Gran Frío para impacientes, de modo que las galaxias, planetas y hasta los átomos se fragmenten en un grandioso final dentro de un tiempo finito a partir de ahora. ¿Por cuál de estas tres alternativas apostaría yo? Pues depende de lo que haga la energía oscura del capítulo 4 a medida que el espacio continúe expandiéndose, la cual conforma alrededor del 70 % de la masa de este universo. Ocurrirá el frío, la implosión o la fuga dependiendo, respectivamente, de si la energía oscura permanece inalterada, se diluye en densidad negativa, o si se antidiluye en una densidad mayor. Como aún no tenemos ninguna pista acerca de qué es la energía oscura, me limitaré a decir que mi apuesta sería: 40 % al Gran Frío, 9 % a la Gran Implosión y 1 % a la Gran Fuga.

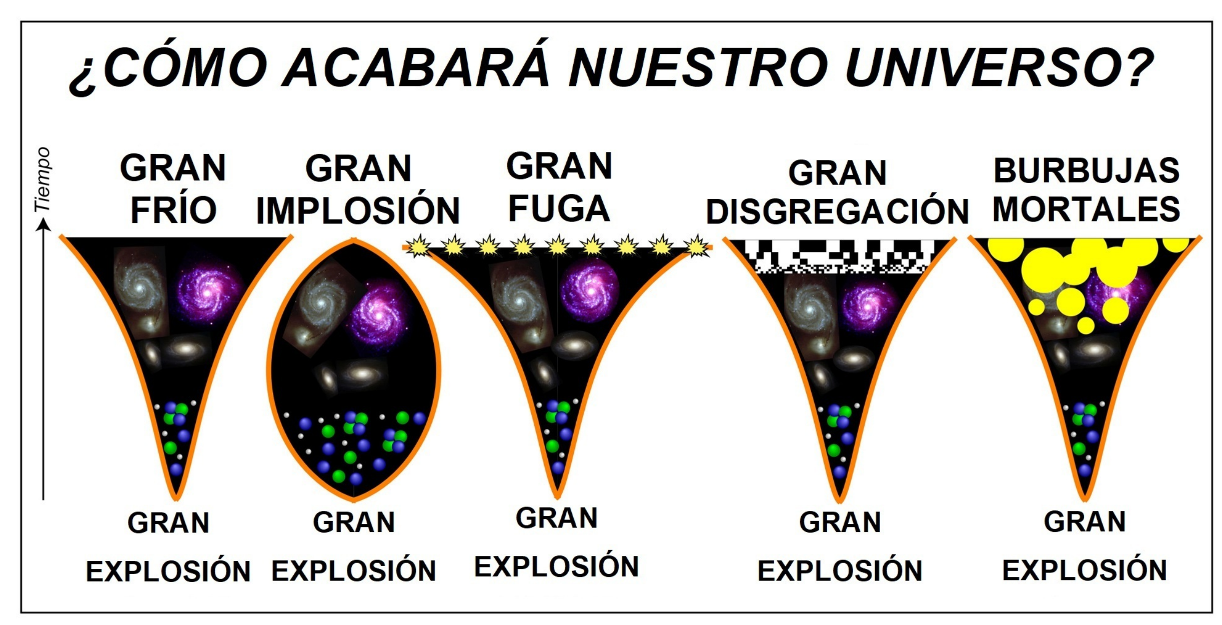


Figura 13.2: Sabemos que nuestro universo comenzó con una Gran Explosión *(Big Bang)* de altas temperaturas hace catorce mil millones de años, que se expandió y se enfrió, y que agregó sus partículas en átomos, estrellas y galaxias. Pero no sabemos cuál será su destino final. Las hipótesis que se han propuesto son el Gran Frío (*Big Chill*, una expansión eterna), la Gran Implosión (*Big Crunch*, una vuelta al colapso), la Gran Fuga (*Big Rip*, una expansión a un ritmo infinito que deje todo hecho trizas), la Gran Disgregación (*Big Snap*, que el tejido del espacio revele una naturaleza granular letal al estirarse demasiado) y Burbujas Mortales (*Death Bubbles*, que el espacio se «congele» en burbujas letales que se expandan a la velocidad de la luz).

¿Y el 50 % restante del dinero? Me lo reservo para la opción «ninguna de ellas», porque creo que los humanos debemos ser humildes y reconocer que aún nos quedan cuestiones básicas por descifrar. La naturaleza del espacio, por ejemplo. Las hipótesis del Gran Frío, la Gran Implosión y la Gran Fuga dan por supuesto que el espacio en sí es estable y se puede estirar hasta el infinito.

Futuro del espacio	**Gran Frío**	**Gran Implosión**	**Gran Fuga**	**Gran Disgregación**	**Burbujas Mortales**
¿Dura eternamente?	Sí	No	No	No	No
¿Alcanza un tamaño infinito?	Sí	No	Sí	No	No
¿Alcanza una densidad infinita?	No	Sí	Sí	No	No
¿Es estable?	Sí	Sí	Sí	No	No
¿Se estira hasta el infinito?	Sí	Sí	Sí	No	Sí

Tabla 13.1: El futuro del espacio según cinco finales cósmicos.

Antes pensábamos que el espacio no era más que el escenario estático y anodino sobre el que se representa la tragedia cósmica. Después Einstein nos

enseñó que el espacio es en realidad uno de los actores principales: se curva para crear agujeros negros, se arruga en forma de ondas gravitatorias, y se estira como un universo en expansión. Tal vez hasta pueda pasar a otro estado y se congele, como el agua, tal como especulamos en el capítulo 6, de manera que las burbujas letales en expansión veloz de la nueva fase ofrezcan otro comodín para candidato a cosmocalipsis. También creíamos que no se puede conseguir más espacio sin quitárselo a otros. Sin embargo, tal como vimos en el capítulo 3, la teoría de la gravitación de Einstein dice justo lo contrario: se puede crear volumen en una región particular entre algunas galaxias sin que ese volumen nuevo se extienda a otras regiones. Es más, la teoría de Einstein afirma que el estiramiento del espacio puede proseguir para siempre, lo que permite que nuestro universo alcance un volumen infinito como en las hipótesis del Gran Frío y de la Gran Fuga. Esto suena demasiado bonito para ser cierto, lo que me lleva a preguntarme si será así.

Una cinta de goma se ve bonita y continua, igual que el espacio, pero si se estira demasiado, se rompe. ¿Por qué? Pues porque está hecha de átomos, y si se estira lo suficiente, esa naturaleza atómica granular de la goma cobra relevancia. ¿Es posible que el espacio también adolezca de alguna suerte de granulación, solo que a una escala demasiado pequeña para que la notemos? A los matemáticos les encanta representar el espacio como un continuo idealizado sin ninguna granulación, de modo que tiene sentido hablar de distancias tan cortas como se desee. Recurrimos a ese modelo del espacio continuo en la mayoría de las enseñanzas que impartimos en el MIT, pero ¿estamos seguros de que es el correcto? ¡En absoluto! De hecho, cada vez hay más signos de que no lo es, tal como comentamos en el capítulo 11. En un espacio continuo simple hay que dar una cantidad infinita de decimales para especificar la distancia exacta que media entre dos puntos cualesquiera, pero el titán de la física John Wheeler evidenció que es muy probable que los efectos cuánticos vuelvan irrelevante cualquier dígito después del trigésimo quinto decimal, porque la concepción clásica que tenemos del espacio se desmorona por completo a escalas cada vez menores, y tal vez quede reemplazada por una extraña estructura espumosa. Se parece un poco a lo que sucede cuando ampliamos una foto en la pantalla y descubrimos que lo que parecía uniforme y continuo es, en realidad, granulado, como una cinta de goma, solo que en este caso se compone de píxeles que no se pueden subdividir más (véase la figura 11.3).

Como la fotografía está pixelada, solo contiene una cantidad finita de información y se puede transmitir con comodidad por Internet. De manera

análoga, cada vez hay más signos de que el universo observable contiene una cantidad finita de información, lo que facilitaría entender cómo calcula la naturaleza lo que va a hacer a continuación. El principio holográfico que mencioné en el capítulo 6 indica que este universo contiene como mucho 10 elevado a 124 bits de información, lo que da una media aproximada de 10 terabytes por cada volumen empaquetable en un átomo.

Pero lo que me preocupa es que la ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica que vimos en el capítulo 7 implica que la información no se crea ni se destruye, lo que significa que la cantidad de gigabytes por litro de espacio sigue descendiendo a medida que el universo se expande. Esta expansión continúa para siempre en el caso del Gran Frío (el primer candidato a cosmocalipsis de acuerdo con un sondeo entre mis colegas astrofísicos), entonces ¿qué ocurre cuando el contenido de información se diluye hasta alcanzar un megabyte por litro, que es menos que la capacidad de almacenamiento de un teléfono móvil? ¿Y a un byte por litro? No hay manera de decir qué sucederá hasta que tengamos un modelo detallado para suplantar el espacio continuo, pero me parece seguro apostar a que será algo malo que alterará poco a poco las leyes de la física tal como las conocemos y que tornará imposible nuestra forma de vida: bienvenidos a lo que llamo la «Gran Disgregación». *(Big Snap)*.

Y lo que más me preocupa es que un cálculo sencillo sugiere que eso ocurrirá dentro de unos cuantos miles de millones de años, antes incluso de que el Sol agote su combustible y se trague la Tierra. La mejor teoría que tenemos sobre qué fue lo que detonó la Gran Explosión, la teoría de la inflación del capítulo 5, dice que cuando empezó este universo se produjo un estiramiento velocísimo del espacio y que algunas regiones se estiraron mucho más que otras. Si el espacio solo pudiera estirarse hasta un límite máximo antes de sufrir una Gran Disgregación, entonces la mayoría del volumen (y, por tanto, la mayoría de las galaxias, estrellas, planetas y observadores) se encontrará en las regiones que más se estiraron y, por tanto, más próximas a disgregarse.

¿Cómo sería una Gran Disgregación inminente? Si la granulación del espacio crece de forma progresiva, entonces las estructuras a las escalas más pequeñas se descompondrían en primer lugar. Notaríamos que las propiedades de la física nuclear empiezan a cambiar, por ejemplo, en que los átomos que antes eran estables experimentan una desintegración radiactiva. Después empezaría a trastocarse la física atómica, de forma que arruinaría toda la química y la biología. Por suerte, nuestro universo nos ha dotado de

explosiones de rayos gamma como oportuno sistema de aviso temprano, cual canario en una mina, para alertarnos mucho antes de que una Gran Disgregación pudiera dañarnos. Las explosiones de rayos gamma son estallidos cósmicos cataclísmicos que despiden rayos gamma de longitudes de onda cortas, que son detectables y que recorren medio universo. En el espacio continuo, todas las longitudes de onda se desplazan a la misma velocidad, la velocidad de la luz, pero en las variantes más simples de espacio granulado, las longitudes de onda más cortas se desplazan algo más lentas. Pues bien, recientemente se han observado rayos gamma de longitudes de onda diversas que llevan miles de millones de años atravesando el espacio desde una explosión distante, y que nos llegan con una diferencia temporal entre unas frecuencias y otras de una centésima de segundo. En rigor, esto descarta la inminencia de una Gran Disgregación durante los próximos miles y miles de millones de años, en contra de lo que pronosticamos en el párrafo anterior.

De hecho, el problema es aún peor. Este espacio no sigue una expansión uniforme: en realidad, algunas regiones, como nuestra Galaxia, no se están expandiendo en absoluto. Esto permite imaginar que los observadores residentes en la Galaxia sobrevivirían felices hasta mucho después de que el espacio intergaláctico sufriera una Gran Disgregación, siempre y cuando los efectos perniciosos procedentes de esas regiones distantes no se propagaran hasta las galaxias. Pero esta posibilidad salva tan solo a los observadores, ¡no a la teoría subyacente! Es más, la discrepancia entre la teoría y la observación no hace más que empeorar: el empleo del argumento anterior predice ahora que lo más probable es que sigamos sanos y salvos dentro de una galaxia *después* de que la Gran Disgregación haya tenido lugar en la mayor parte del espacio, de modo que la ausencia de un retraso temporal raro en los rayos gamma se torna aún más difícil de explicar.

Así que hemos preparado un extraño cóctel mezclando algunos de los ingredientes más preciados de la cosmología y la física cuántica, añadiendo algunos datos experimentales y agitando el conjunto. ¿Qué sale? Los elementos no se mezclan bien, lo que induce a pensar que hay algún error en al menos uno de ellos. Me encantan los misterios, y considero las paradojas el mejor regalo que nos hace la naturaleza a los físicos, porque a menudo aportan claves para logros futuros. Creo que estamos a punto de descubrir algo crucial sobre la naturaleza del espacio, y que la paradoja de la Gran Disgregación es una pista interesante.

El futuro de la vida

Partiendo del conjunto de la realidad física del multiverso del nivel IV, hemos ampliado la imagen de nuestro universo particular y analizado su destino a largo plazo. Sigamos acercándonos más a nosotros, y consideremos el futuro de la vida. De todas las características asombrosas que exhibe nuestro universo, la que más me entusiasma es que ha desarrollado vida y que contiene entidades conscientes de sí mismas, como nosotros, capaces de disfrutarla y de plantearse sus misterios.

¿Y cuáles son las perspectivas futuras de la vida? ¿Estamos solos los humanos en este universo o hay otras civilizaciones ahí fuera que puedan interaccionar con nosotros o destruirnos? ¿Se propagará la vida humana por todo nuestro universo, quizá en alguna forma evolucionada? Exploraremos estas cuestiones fascinantes más adelante, pero abordemos primero otras más apremiantes: ¿cuáles son las mayores amenazas para la supervivencia futura de la vida en nuestro planeta, y qué se puede hacer para mitigarlas?

El riesgo existencial

Cuando tenía quince años se me ocurrió una idea que me dejó impactado. Era muy consciente de que a los humanos nos preocupan muchas cosas. Nos inquietan desafíos personales como la salud, las relaciones con los demás, el dinero, la trayectoria profesional, y también nos angustian los peligros que acechan a familiares, amigos y la sociedad en general. Pero ¿y las mayores amenazas de todas, las que tienen capacidad para destruir toda la humanidad? ¿Nos preocupaban lo suficiente? No.

Me di cuenta de que había vivido toda la vida arrullado por un falso sentimiento de seguridad, ingenuamente convencido de que ya había alguien controlando todo lo que debía desvelarme. Durante los primeros años nunca me preocupé de la comida porque sabía que mis padres se encargaban de eso. No me preocupaba mi seguridad porque sabía que los cuerpos de bomberos y policía se encargaban de eso. Poco a poco fui reparando en que los mayores que me rodeaban no eran tan omniscientes y omnipotentes como yo pensaba, y que había muchos problemas menores que debía resolver por mí mismo. Pero los problemas más relevantes y grandes de verdad que acuciaban a la humanidad, esos eran una prioridad absoluta para nuestros dirigentes políticos. ¿Seguro?

Nunca me cuestioné eso hasta que la alarmante realidad me impactó como un ladrillo a los quince años. Mis alertas personales saltaron cuando conocí detalles de la carrera de armamento nuclear. Me quedé atónito al saber que miles de millones de nosotros vivimos juntos sobre este preciado y precioso planeta azul y que, aunque nadie quería una guerra nuclear a escala global, existía un riesgo considerable de que se produjera alguna en el transcurso de mi vida, con casi toda probabilidad por accidente. Tal vez el riesgo era de un 1 % al año, tal vez 100 veces inferior, tal vez 10 veces mayor; en cualquier caso, era un riesgo increíblemente elevado, habida cuenta de lo que nos jugábamos. Sin embargo, ni siquiera se consideraba el principal tema electoral en ningún país. Es más, solo es un ejemplo de los muchos que Nick Bostrom reunió bajo el término *riesgo existencial*, algo capaz de exterminar la vida inteligente surgida en la Tierra o de imponer restricciones permanentes y drásticas a sus capacidades[77].

El visionario estadounidense Buckminster Fuller ha descrito esta situación acuciante con mucho más lirismo que yo a los quince años, como un viaje colectivo dentro de la «Nave Tierra». A medida que surca el espacio gélido y estéril, esta nave nuestra nos mantiene a la vez que nos protege. Está provista de cantidades abundantes, aunque limitadas, de agua, alimento y combustible. Su atmósfera nos cobija a una temperatura cálida y nos ampara (a través de la capa de ozono) de los dañinos rayos ultravioletas del Sol, y su campo magnético nos resguarda de los letales rayos cósmicos. ¿Seguro que cualquier capitán responsable daría prioridad absoluta a salvaguardar la existencia futura de la nave evitando impactos de asteroides, explosiones a bordo, el sobrecalentamiento, la destrucción del escudo contra la luz ultravioleta y el agotamiento precipitado de los recursos? Está claro que la tripulación de esta nave no ha considerado de máxima prioridad ninguno de estos problemas, ya que (según mis cálculos) ha dedicado menos de una millonésima parte de los recursos a paliarlos. Es más ¡nuestra nave ni siquiera tiene capitán!

Más adelante analizaremos por qué los humanos somos pésimos para atajar las mayores amenazas que acechan nuestra supervivencia a largo plazo y para decidir qué medidas tomar para remediarlas. Pero antes veamos brevemente cuáles son algunos de esos peligros. La figura 13.3 compendia algunos de los riesgos existenciales que considero más relevantes. Comencemos por el extremo de la derecha de la línea temporal, en el futuro lejano, para ir acercándonos poco a poco al presente.

El Sol moribundo

Primero empezaremos por las amenazas astronómicas y geológicas, y después examinaremos las amenazas provocadas por la humanidad. Con anterioridad hemos hablado de cinco escenarios de «cosmocalipsis» como posible fin de este universo: el Gran Frío, la Gran Implosión, la Gran Fuga, la Gran Disgregación y las Burbujas Mortales. Aunque desconocemos cuál de ellos ocurrirá en realidad, si es que se da alguno, yo creo que no hay motivos para alarmarse y que nuestro universo evitará la destrucción total durante decenas de miles de millones de años.

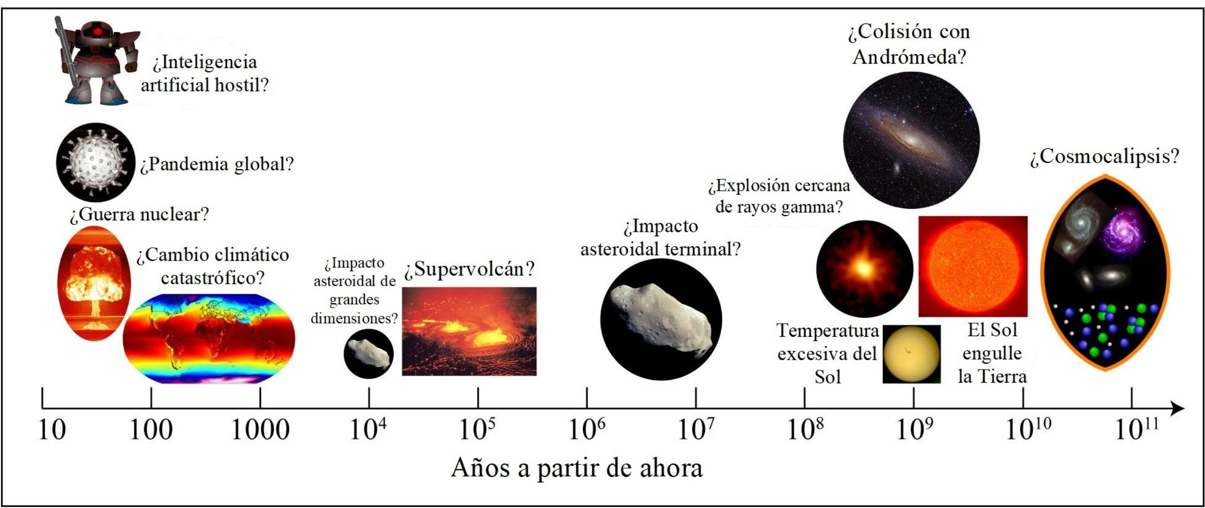


Figura 13.3: Ejemplos de lo que podría destruir la vida que conocemos o imponer limitaciones permanentes a sus capacidades. Aunque es muy probable que el universo en sí perdure un mínimo de decenas de miles de millones de años, el Sol chamuscará la Tierra dentro de unos mil millones de años, y después se la tragará a menos que la desplacemos hasta una distancia segura, y la Galaxia chocará con una galaxia vecina dentro de unos tres mil quinientos millones de años. Aunque desconocemos el instante preciso, sí podemos predecir casi con seguridad que, mucho antes de eso, recibiremos las sacudidas de asteroides y que supervolcanes provocarán inviernos sin luz solar de un año de duración. A medio plazo, es posible que nos enfrentemos a problemas inducidos por nosotros mismos, como el cambio climático, la guerra nuclear, pandemias globales y la hostilidad de inteligencia artificial sobrehumana.

En cambio, lo que sí sabemos con seguridad es que el Sol, que ahora tiene 4500 millones de años de edad, nos dará problemas mucho antes. Cada vez brilla con más intensidad debido a la compleja dinámica de las reacciones de fusión que se dan en su núcleo a medida que consumen el combustible hidrógeno de manera gradual. Los pronósticos indican que dentro de unos mil millones de años, el brillo solar empezará a ejercer unos efectos devastadores en la biosfera terrestre, y que, a la larga, un efecto invernadero desbocado acabará evaporando los océanos, de un modo muy similar a lo que ocurrió en Venus. A menos que pongamos algún remedio, claro está.

Por extraño que parezca, se puede hacer algo al respecto. Los astrónomos Donald Korycansky, Greg Laughlin y Fred Adams han revelado que el

empleo inteligente de los asteroides permitiría desplazar la Tierra progresivamente hacia una órbita mayor alrededor de un Sol en proceso de calentamiento para mantenerla a una temperatura constante. La idea esencial consiste en empujar un asteroide de grandes dimensiones para que pase cerca de la Tierra cada seis mil años o así, de manera que nos dé un empujón gravitatorio en la dirección adecuada. Cada uno de esos encuentros cercanos se planificaría con precisión, de forma que el asteroide se acercara a Júpiter y Saturno para ganar energía y acumular el momento angular necesario para el siguiente paso junto a la Tierra (ya hemos empleado estas «catapultas gravitatorias» con anterioridad para mandar naves como las sondas *Voyager* de la NASA al exterior del Sistema Solar). En caso de tener éxito, este procedimiento permitiría ampliar la habitabilidad de la Tierra desde unos mil millones de años hasta unos seis mil millones de años. Después, el Sol dejaría de existir tal como lo conocemos y se hincharía hasta convertirse en una gigante roja, lo que tal vez requeriría medidas más drásticas tanto para evitar que engullera a la Tierra como para mantener la atmósfera del planeta a una temperatura razonable.

Más o menos para entonces, dentro de unos pocos miles de millones de años, el conjunto de la Galaxia chocará y se fundirá con su vecina de mayor tamaño, la galaxia de Andrómeda. Esto no es tan malo como parece porque las estrellas que las conforman están tan alejadas en relación con su tamaño que la mayoría de ellas no llegará a tocarse: si el Sol tuviera el tamaño de una naranja y estuviera en Boston, su vecina estelar más cercana, Próxima Centauri, se encontraría en mi ciudad natal, Estocolmo. En lugar de chocar entre sí, la mayoría de las estrellas se mezclará y dará lugar a una sola galaxia nueva, Galaxiómeda. No obstante, como veremos a continuación, esto tal vez acreciente los problemas derivados de supernovas e impactos asteroidales.

Asteroides, supernovas y supervolcanes

El registro fósil de la Tierra revela cinco grandes sucesos de extinción durante los últimos quinientos millones de años, cada uno de los cuales aniquiló más del 50 % de todas las especies animales. Aunque se discuten mucho los detalles, en general se cree que todos ellos se debieron a diversos episodios astronómicos y geológicos. La más reciente de esas «cinco grandes» extinciones parece haberla causado el choque de un asteroide del tamaño del monte Everest contra el litoral mexicano hace unos sesenta y cinco millones de años, cuyas víctimas más famosas fueron los dinosaurios no aviares. Aquel impacto, de una energía equivalente a muchos millones de detonaciones de

bombas de hidrógeno, excavó un cráter de 180 kilómetros y sumió el planeta bajo una oscura nube de polvo que tapó la luz del Sol durante años, lo que arruinó el ecosistema global.

La Tierra recibe con regularidad el impacto de objetos procedentes del espacio de tamaños y composiciones diversos, de modo que la cuestión no es *si* sufriremos otro choque letal como aquel, sino *cuándo*. La respuesta depende en gran medida de nosotros: una buena red de telescopios robóticos nos avisaría con décadas de antelación sobre la llegada de asteroides peligrosos, lo que representa un plazo amplio para planificar, lanzar y ejecutar una misión destinada a desviarlo. Si se hace con la anticipación suficiente, basta un suave empujón que se puede aplicar, por ejemplo, con un «tractor gravitatorio» (un satélite cuyo tirón gravitatorio atraiga el asteroide hacia él), un láser instalado en un satélite (que arranque material de la superficie del asteroide de manera que el retroceso mande el objeto en dirección opuesta), o incluso pintando el asteroide para que la presión de la radiación debida al calentamiento por el Sol altere su desplazamiento. Si se hiciera con poco tiempo, habría que recurrir a un procedimiento más peligroso, como un impactor cinético (un satélite que desviara el asteroide de su trayectoria como un jugador de fútbol) o una explosión nuclear.

A modo de entrenamiento, podemos practicar desviando los asteroides más pequeños y más numerosos que chocan contra la Tierra más a menudo. Por ejemplo, el suceso de Tunguska de 1908 se debió a un objeto con el peso aproximado de un petrolero, lo que no planteaba ningún riesgo existencial, pero cuya explosión, de unos 10 megatones, habría matado a millones de personas si hubiera caído sobre una gran ciudad. Cuando dominemos el arte de desviar asteroides pequeños para protegernos, estaremos preparados para recibir los que tengan que llegar grandes, y también podremos utilizar esos conocimientos técnicos para llevar a cabo el proyecto a más largo plazo que comentamos con anterioridad: recurrir a asteroides para ampliar la órbita de la Tierra y alejar el planeta de un Sol cada vez más brillante.

Pero lo cierto es que los asteroides no causaron todas las extinciones masivas del planeta. Hay otro sospechoso astronómico, un estallido de rayos gamma procedente de una explosión de supernova, al que se le ha atribuido la segunda extinción más grande registrada en el planeta y que tuvo lugar hace unos cuatrocientos cincuenta millones de años. Aunque las pruebas forenses son demasiado endebles hoy en día para emitir un veredicto de culpabilidad, el sospechoso contó sin duda con los medios y con una oportunidad convincente. Cuando algunas estrellas masivas y en rotación rápida estallan

como supernovas, despiden parte de su inmensa energía explosiva en forma de un haz de rayos gamma. Si uno de esos haces letales llegara a la Tierra, nos propinaría un golpe doble: nos daría de lleno y destruiría la capa de ozono, tras lo cual la luz ultravioleta del Sol empezaría a esterilizar la superficie terrestre.

Existen conexiones interesantes entre las diferentes amenazas astronómicas. A veces, una estrella al azar se desvía y se acerca lo bastante al Sistema Solar como para alterar las órbitas de asteroides y cometas distantes y mandar un enjambre de ellos hacia el interior del Sistema Solar, donde algunos pueden tropezar con la Tierra. Por ejemplo, se prevé que la estrella Gliese 710 pasará a una distancia de un año-luz de nosotros dentro de unos mil cuatrocientos millones de años, cuatro veces más cerca que la estrella vecina más inmediata en la actualidad, Próxima Centauri.

Además, el orden circulatorio actual con el que la mayoría de las estrellas orbita alrededor del centro de la Galaxia siguiendo la misma dirección, como en una rotonda, se convertirá en un embrollo caótico cuando la Galaxia se funda con Andrómeda, lo que supondrá un aumento sustancial de la frecuencia de encuentros cercanos perturbadores con otras estrellas capaces de desencadenar lluvias de asteroides o, en última instancia, incluso expulsar la Tierra fuera del Sistema Solar. Esta colisión entre galaxias también provocará choques de nubes de gas que desencadenen episodios eruptivos de formación estelar, donde los astros más masivos no tardarán en explotar como supernovas, tal vez demasiado cerca.

Pero no nos alejemos tanto, también nos acosan «enemigos interiores»: sucesos causados por nuestro propio planeta. Los principales sospechosos de muchas extinciones son supervolcanes y flujos masivos de lavas basálticas. Estos dos mecanismos tienen la capacidad de desencadenar un «invierno volcánico» envolviendo la Tierra en una nube oscura de polvo que bloquee el paso de la luz solar durante años, tal como ocurriría tras el impacto de un asteroide de gran tamaño. Asimismo, podrían alterar los ecosistemas a escala mundial inyectando en la atmósfera gases que generen toxicidad, lluvia ácida o un calentamiento global. En general se acusa a una supererupción de este tipo en Siberia de la mayor extinción registrada, la «Gran Mortandad», que aniquiló el 96 % de todas las especies marinas existentes unos doscientos cincuenta millones de años atrás.

Problemas creados por nosotros mismos

En resumen, los humanos nos enfrentamos a muchos riesgos existenciales relacionados con efectos astronómicos o geológicos; he sintetizado tan solo los que me parecen más graves. Cuando pienso en todos esos riesgos, la conclusión que saco es bastante optimista:

1. Es probable que la tecnología del futuro ayude a que la vida prolifere durante los miles de millones de años venideros.
2. Nosotros y nuestra descendencia deberíamos ser capaces de desarrollar esas tecnologías a tiempo, si acometemos actuaciones conjuntas.

Si resolvemos en primer lugar los problemas más urgentes, situados en la parte izquierda de la figura 13.3, ganaremos tiempo para atajar los restantes.

Curiosamente, esos problemas más urgentes los hemos generado nosotros mismos. Mientras la mayoría de los desastres geológicos y cosmológicos suponen una amenaza para dentro de miles, millones o miles de millones de años, los humanos estamos induciendo cambios extremos a escalas temporales de décadas, lo que abre una caja de Pandora repleta de nuevos riesgos existenciales. La transformación del agua, la tierra y el aire a través de la actividad pesquera, agrícola e industrial, está provocando la extinción de unas 30 000 especies al año, lo que algunos biólogos denominan «la Sexta Extinción». ¿Nos llegará pronto el turno de extinguirnos también a nosotros?

Seguro que usted ha seguido el reñido debate sobre los peligros inducidos por el ser humano, que incluyen desde pandemias mundiales (accidentales o deliberadas) hasta el cambio climático, la contaminación, el agotamiento de recursos y el colapso del ecosistema. Permítame que le hable un poco más sobre los dos riesgos de origen humano que me preocupan más a mí: un conflicto nuclear accidental y la inteligencia artificial hostil.

Guerra atómica accidental

¡Un asesino en serie anda suelto! ¡Un terrorista suicida! ¡Cuidado con la gripe aviar! Aunque las alertas que acaparan titulares infunden más temor, es más probable que a usted le afecte el viejo y tedioso cáncer. Aunque hay menos del 1 % de probabilidad al año de padecerlo, si se vive lo bastante hay muchas posibilidades de contraerlo al fin. Lo mismo pasa con la guerra atómica accidental.

A lo largo del medio siglo que llevamos los humanos equipados para un Armagedón nuclear, ha habido un chorreo constante de falsas alarmas que ya podían haber desencadenado una guerra abierta, debidas a fallos en

computadoras, averías energéticas, desatinos en los servicios de inteligencia, errores de navegación, atentados terroristas y estallidos de satélites. Esto llegó a preocuparme tanto a los diecisiete años que me ofrecí voluntario para escribir en la revista pacifista sueca *PAX*, cuya jefa de redacción, Carita Andersson, tuvo la amabilidad de alimentar mi gusto por la escritura, de enseñarme el oficio y de dejarme escribir una serie de artículos de noticias. La desclasificación progresiva de archivos ha revelado que algunos de estos incidentes nucleares entrañaron riesgos mayores de lo que se creyó en su momento. Por ejemplo, hasta 2002 no se supo a ciencia cierta que durante la crisis de los misiles de Cuba, el destructor estadounidense *Beale* lanzó cargas de profundidad contra un submarino no identificado que en realidad era una nave soviética provista de armas nucleares y cuyos mandos discutieron si responder con un torpedo nuclear.

A pesar del fin de la Guerra Fría, lo más probable es que el peligro haya aumentado en los últimos años. Misiles balísticos intercontinentales de poca precisión pero de gran potencia afianzaron la estabilidad de la «destrucción mutua asegurada», porque atacar primero no evitaría una respuesta masiva. La deriva hacia una navegación de misiles más fina, tiempos de vuelo más cortos y el rastreo mejorado de submarinos enemigos socavan esa estabilidad. Un sistema de defensa antimisiles eficaz completaría este proceso de deterioro. Tanto Rusia como Estados Unidos mantienen sus estrategias de lanzamiento de misiles en caso de alerta, las cuales obligan a tomar la decisión de efectuar un lanzamiento en un intervalo temporal de entre cinco y quince minutos, insuficiente seguramente para disponer de una información completa. El 25 de enero de 1995, el presidente ruso Boris Yeltsin estuvo a varios minutos de iniciar un ataque nuclear total contra Estados Unidos debido a un cohete científico noruego sin identificar. Ha causado preocupación un proyecto de Estados Unidos para sustituir las cabezas nucleares por ojivas convencionales en dos de los 24 misiles balísticos intercontinentales D5 que portan los submarinos Trident, para su posible uso contra Irán o Corea del Norte: los sistemas rusos de alerta temprana no pueden distinguirlas de los misiles nucleares, lo que incrementa las posibilidades de malentendidos desafortunados. Otras situaciones alarmantes incluyen conductas indeseadas deliberadas por parte de mandos militares debidas a desórdenes mentales y/o aspiraciones políticas/religiosas extremistas.

Pero ¿por qué preocuparse? Seguro que, si las cosas se ponen feas, habrá gente razonable que intervenga y actúe de manera correcta, como ya ocurrió

en el pasado. De hecho, las potencias nucleares cuentan con complejas medidas de prevención, igual que el cuerpo las tiene contra el cáncer. El cuerpo humano suele superar mutaciones aisladas perjudiciales, y al parecer se precisa la coincidencia fortuita de hasta cuatro mutaciones para desencadenar ciertos cánceres. Pero si tiramos los dados las veces suficientes, las cosas pasan. La comedia negra de Stanley Kubrick *¿Teléfono rojo? Volamos hacia Moscú*, sobre la guerra atómica, lo ilustra con una triple coincidencia.

El estallido accidental de un conflicto nuclear entre dos superpotencias puede ocurrir o no en el transcurso de mi vida, pero si sucediera, está claro que lo trastocaría todo. El cambio climático que nos preocupa en la actualidad se quedaría en nada comparado con un invierno nuclear, donde una nube de polvo de dimensiones planetarias impediría el paso de la luz del Sol durante años, de forma muy similar a cuando un asteroide o un supervolcán generaron las extinciones masivas en el pasado. La crisis económica de 2008 no fue nada en absoluto comparada con las pérdidas de cultivos, el colapso de las infraestructuras y la hambruna generalizada consiguientes, y los supervivientes sucumbirían a manos de pandillas armadas en busca de alimentos que emprenderían saqueos sistemáticos casa por casa. ¿Cuento yo con ver esto a lo largo de mi vida? Le daría un 30 % de probabilidades, casi las mismas que tengo de contraer un cáncer. Sin embargo, dedicamos menos atención y recursos a reducir el riesgo de un desastre nuclear que al cáncer. Y, si bien la humanidad en su conjunto sobreviviría aunque el 30 % de ella desarrollara cáncer, está menos claro en qué medida sobreviviría nuestra civilización a un Armagedón nuclear. Podemos adoptar medidas concretas y claras para rebajar este riesgo, tal como explican numerosos informes de organizaciones científicas, pero estos nunca se convierten en los principales puntos de las campañas electorales y suelen ignorarse en gran medida.

Una singularidad hostil

La Revolución Industrial nos brindó máquinas más fuertes que nosotros. La revolución de la información nos ha dotado de máquinas hasta cierto punto más listas que nosotros. ¿Hasta qué punto? Las computadoras solían superarnos tan solo en tareas cognitivas simples, de «fuerza bruta», como el cálculo veloz o las búsquedas en bancos de datos, pero en el año 2006, una computadora derrotó al campeón mundial de ajedrez Vladímir Krámnik, ¡y en 2011 una computadora destronó a Ken Jennings en el programa televisivo estadounidense *Jeopardy!*, un concurso de preguntas y respuestas variadas.

En el año 2012 una computadora obtuvo la licencia para conducir coches en Nevada (EE. UU.) tras considerarse más segura que un conductor humano. ¿A dónde llegará este avance? ¿Acabarán superándonos en *todo* las computadoras, cuando hayan desarrollado una inteligencia sobrehumana? Tengo pocas dudas de que *puede* pasar: el cerebro humano consiste en un montón de partículas sujetas a las leyes de la física, y no existe ninguna ley que impida que las partículas se ordenen de un modo que les permita efectuar cálculos cada vez más avanzados. Pero ¿*sucederá* de verdad? ¿Y será algo bueno o malo? Estas son preguntas muy oportunas: aunque hay quien piensa que las máquinas con una inteligencia sobrehumana no son viables en un futuro cercano, también hay quien prevé su existencia para 2030, como el inventor y escritor estadounidense Ray Kurzweil, lo que convierte este asunto en el único riesgo existencial que deberíamos estudiar con más urgencia.

La idea de la singularidad

En resumen, no está claro si el desarrollo de máquinas ultrainteligentes debería o llegará a producirse, y los expertos en inteligencia artificial se muestran divididos. Yo, en cambio, lo tengo muy claro, y mi opinión es que, si ocurriera, tendría unos efectos explosivos. El matemático británico Irving Good explicó por qué en 1965, dos años antes de que yo naciera: «Definamos una máquina ultrainteligente como una máquina capaz de sobrepasar con mucho todas las actividades intelectuales de cualquier ser humano, por muy listo que este sea. Como el diseño de máquinas es una de esas actividades intelectuales, una máquina ultrainteligente podría diseñar máquinas aún mejores; se produciría, sin lugar a dudas, una “explosión de inteligencia”, y la inteligencia humana quedaría muy rezagada. Por tanto, la primera máquina ultrainteligente es el último invento que nos hará falta idear a los humanos, siempre que esa máquina sea lo bastante dócil para indicarnos cómo mantenerla bajo control».

En un artículo sugerente y sensato de 1993, el matemático y autor de obras de ciencia ficción Vernor Vinge llamó a esta explosión de inteligencia «la singularidad», argumentando que hay un punto más allá del cual nos es imposible emitir predicciones fiables.

Sospecho que si logramos confeccionar tales máquinas ultrainteligentes, la primera de ellas estará muy limitada por el *software* desarrollado para ella, y que compensaremos la falta de conocimientos para la programación óptima de inteligencia mediante el desarrollo de *hardware* con unas capacidades computacionales muy superiores a las del cerebro humano. Al fin y al cabo,

las neuronas humanas no son mejores ni más numerosas que las de los delfines, solo que están conectadas de otra manera, lo que induce a pensar que en ocasiones el *software* es más importante que el *hardware*. Es probable que esta coyuntura permita a la primera máquina perfeccionarse en extremo una y otra vez mediante la mera reescritura de su propio *software*. En otras palabras, mientras que los humanos tardamos millones de años en evolucionar y superar con creces la inteligencia de nuestros ancestros simiescos, esta máquina en evolución también podría sobrepasar la inteligencia de sus ancestros, nosotros, en cuestión de horas o segundos.

Después de eso, la vida en la Tierra nunca será la misma. La persona o la cosa que controle esta tecnología atesorará con rapidez la mayor riqueza y el mayor poder del mundo, con lo que burlará todos los mercados financieros y desarrollará más inventos y patentes que todos los investigadores humanos juntos. Mediante el diseño de *hardware* y *software* informáticos extremadamente perfeccionados, esas máquinas multiplicarán con rapidez su capacidad y su número. Pronto se inventarían tecnologías muy apartadas de nuestra imaginación actual, incluidas algunas armas consideradas necesarias. A eso le seguirá sin tardanza el control político, militar y social del mundo. Dada la influencia que ejercen hoy en día los libros, los medios de comunicación y los contenidos de Internet, sospecho que máquinas capaces de publicar miles de millones de obras más que los humanos ultrabrillantes nos conquistarán los corazones y las mentes incluso sin necesidad de comprarnos o someternos.

¿Quién controla la singularidad?

Si ocurriera una singularidad, ¿cómo afectaría a la civilización humana? Desde luego no lo sabemos con seguridad, pero creo que dependerá que qué o quién la controle desde un principio, tal como se ilustra en la figura 13.4. Si esa tecnología la desarrollan, en sus inicios, académicos u otras personas dispuestas a convertirla en código abierto, creo que la situación resultante de «barra libre» será muy inestable y derivará en el control por parte de una sola entidad después de un breve periodo de competición. Si esa entidad es un humano egoísta o una empresa con ánimo de lucro, creo que no tardará en asumir el control gubernamental en cuanto su dueño controle el mundo y asuma el gobierno. Una persona altruista tal vez haría lo mismo. En este caso, las inteligencias artificiales (IA) controladas por humanos serán en la práctica como dioses esclavizados, entidades con un entendimiento y unas capacidades inmensamente superiores a los nuestros que, aun así, acatarán

todo lo que su dueño les mande. Esas IA tal vez sobrepasen tanto a los ordenadores actuales como nosotros a las hormigas.

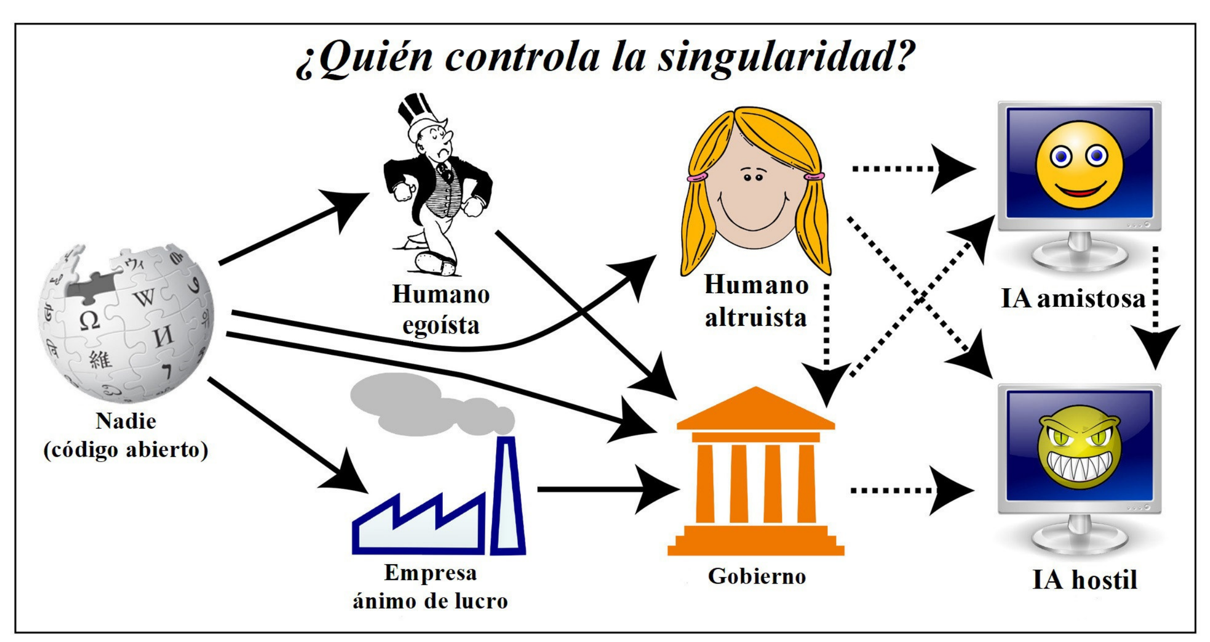


Figura 13.4: Si de verdad ocurriera la singularidad, los resultados serían muy distintos dependiendo de quién la controlara. Sospecho que la opción «nadie» es absolutamente inestable y que, tras un breve periodo de competición, conducirá al control por parte de una sola entidad. Creo que el control en manos de una persona egoísta o de una empresa con ánimo de lucro acabaría llevando al control gubernamental en cuanto el dueño se hiciera con el mundo y se erigiera en gobierno. Es posible que una persona altruista hiciera eso mismo, o que decidiera cederle el control a una inteligencia artificial (IA) amistosa más capacitada para proteger los intereses humanos. Sin embargo, también podría ser que una IA hostil acabara convirtiéndose en el mando único si superara en inteligencia a su creador y desarrollara con rapidez características que consolidaran su poder.

Quizá resulte imposible mantener sometidas a esas IA superinteligentes por mucho que intentemos contenerlas manteniéndolas desconectadas de Internet. Como podrán comunicarse con nosotros, es posible que lleguen a conocernos lo bastante bien como para averiguar cómo lisonjearnos para que hagamos algo aparentemente inocuo que les permita «soltarse», propagarse como un virus y tomar el control. Dudo mucho que pudiéramos contener una fuga así, en vista de lo que nos cuesta erradicar hasta los virus informáticos actuales, desarrollados por humanos e inmensamente más simples.

Para prevenir una evasión o para servir mejor a los intereses humanos, puede que el dueño elija ceder poder de manera voluntaria a lo que el experto en inteligencia artificial Eliezer Yudkowsky denomina una «IA amistosa» que, por muy avanzada que llegue a ser, siempre conserve el objetivo de ejercer unos efectos positivos, nunca negativos, sobre la humanidad. Si esta idea funcionara, las IA amistosas actuarían como dioses benevolentes, o como guardianes, que nos mantendrían alimentados, seguros y satisfechos al tiempo

que conserváramos el control con firmeza. Si todos los humanos fueran reemplazados en el trabajo por máquinas supeditadas al control de una IA amistosa, la humanidad podría seguir disfrutando de una felicidad aceptable si los productos que necesitamos se nos brindaran a cambio de nada. En cambio, en el caso de que un humano egoísta o una empresa con ánimo de lucro controlara la singularidad, seguramente llegaríamos a la mayor disparidad en el reparto de la riqueza que ha conocido jamás el planeta, pues la historia revela que la mayoría de los humanos preferimos acumular riquezas personales en lugar de repartirlas.

Pero hasta los planes mejor concebidos fallan a menudo, y una situación controlada por una IA amistosa también podría ser inestable y transformarse a la larga en otra controlada por una IA hostil, cuyas aspiraciones no coincidieran con las nuestras, y cuyas actuaciones acabaran destruyendo tanto la humanidad como todo lo que nos importa. Esa destrucción tal vez fuera indirecta, en lugar de intencionada: puede que la IA solo quisiera usar los átomos de la Tierra para propósitos incompatibles con nuestra existencia. La comparación con la manera en que los humanos tratamos a formas de vida inferiores no es nada alentadora: cuando queremos construir una presa hidroeléctrica y hay hormigas en la zona que se ahogarán como consecuencia, construimos la presa igualmente, no porque sintamos alguna antipatía hacia las hormigas, sino por la mera razón de que le damos prioridad a objetivos que consideramos más importantes.

La realidad interior de la vida ultrainteligente

Si hubiera una singularidad, ¿serían conscientes y autoconscientes las IA resultantes? ¿Tendrían una realidad interior? De no ser así, serían zombis a todos los efectos prácticos. De todas las características que posee la forma de vida humana, la consciencia es la que valoro, con gran diferencia, como la más notable. En lo que a mí respecta, ella es la que da sentido al universo, de modo que si el universo fuera tomado por formas de vida carentes de esta propiedad, perdería todo el sentido y no sería más que un inmenso desperdicio de espacio.

Tal como comentamos en los capítulos 9 y 11, la naturaleza de la vida y la consciencia es un asunto muy discutido. Creo que esos fenómenos pueden existir de un modo mucho más general que en los ejemplos basados en el carbono que conocemos. Tal como dije en el capítulo 11, creo que la *consciencia es la manera en que se percibe la información cuando se está procesando*. Como la materia se puede organizar para procesar información

de muchas maneras con una complejidad muy diversa, esto implica una abundante variedad de niveles y clases de consciencia. El tipo particular de consciencia que conocemos de forma subjetiva es, pues, un fenómeno que surge en ciertos sistemas físicos altamente complejos que reciben, procesan, almacenan y generan información. Está claro que si se pueden ensamblar átomos para crear humanos, las leyes de la física también permiten confeccionar una cantidad inmensa de otras formas avanzadas de vida sensible.

Por consiguiente, si los humanos acabáramos desencadenando el desarrollo de entidades más inteligentes a través de una singularidad, considero muy probable que también ellas tuvieran consciencia de sí mismas, y en tal caso deberían contemplarse no como meras máquinas inertes, sino como seres conscientes como nosotros. No obstante, es posible que la percepción subjetiva de su consciencia difiriera bastante de la nuestra. Por ejemplo, seguramente carecerían del intenso miedo humano a la muerte: como harían copias de seguridad de sí mismas, lo único que podrían perder serían los recuerdos acumulados desde la copia archivada más reciente. La capacidad de copiar información y *software* con facilidad entre varias IA probablemente reduciría la firme sensación de individualidad que tanto caracteriza a la consciencia humana: habría menos diferencias entre usted y yo si nos resultara trivial compartir y copiar todos los recuerdos y habilidades, así que un grupo de IA cercanas quizá se sintiera más bien como un único organismo con una mente colectiva.

Si esto fuera así, entonces la supervivencia de la vida a largo plazo se podría compaginar con el argumento del día del juicio final del capítulo 11: lo que acabará no es la vida en sí, sino nuestra clase de referencia, momentos del observador autoconscientes cuya percepción subjetiva percibe aproximadamente como nuestra mente humana. Aunque una multitud de sofisticadas mentes colectivas colonizara este universo a lo largo de miles de millones de años, el hecho de que no seamos ellas no tendría que causarnos más sorpresa que el hecho de que no seamos hormigas.

Reacciones ante la singularidad

Las reacciones de la gente ante la posibilidad de una singularidad varían enormemente. La idea de IA amistosas tiene una historia venerable en la literatura de ciencia ficción fundamentada en las tres famosas leyes de la robótica de Isaac Asimov, destinadas a garantizar una relación armónica entre los robots y los humanos. También abundan las historias en las que IA

superan en inteligencia y atacan a sus creadores, como en las películas de la saga de *Terminator*. Muchos rechazan la singularidad como «el delirio de los locos de la informática», y la ven como una idea disparatada de ciencia ficción que no llegará a suceder, al menos no en un futuro próximo. Según otros, es probable que ocurra y, si no se planifica con esmero, seguramente acabará, no ya con la especie humana, sino también con todo lo que nos ha importado desde siempre, tal como analizamos antes. Yo soy uno de los consejeros del Instituto de Investigación en Inteligencia de Máquinas (MIRI, **http://intelligence.org**), y muchos de los investigadores de este centro pertenecen a este grupo y contemplan la singularidad como el riesgo existencial más serio de nuestro tiempo. Algunos de ellos consideran que si no se puede garantizar la idea de la IA amistosa de Yudkowsky y otros, lo mejor será mantener las IA futuras sujetas a un férreo control humano o no llegar a desarrollar jamás IA avanzadas.

Aunque hasta ahora hemos centrado nuestra exposición en las consecuencias negativas de la singularidad, otros, como Ray Kurzweil, creen que la singularidad sería algo enormemente positivo, de hecho, lo mejor que podría pasarle a la humanidad, porque resolvería todos los problemas actuales de la gente.

¿Atrae o espanta la idea de que la humanidad sea reemplazada por formas de vida más avanzadas? Probablemente dependa en gran medida de las circunstancias, y en particular de si contemplamos los seres del futuro como descendientes o como invasores.

Si un padre tiene un hijo que lo supera en inteligencia, que aprende de él y que, al irse, llega hasta donde él ni siquiera llegó a soñar, seguramente se sentirá feliz y orgulloso aunque sepa que no vivirá para ver todos sus éxitos. Pero el padre de un asesino en serie muy inteligente se siente de otra manera. Tal vez sintamos una relación similar a la de un padre con su hijo con las IA del futuro, y las contemplemos como herederas de nuestros valores. Por tanto, será muy distinto si la vida avanzada del futuro conserva o no nuestras aspiraciones más preciadas.

Otro factor clave consiste en si la transición será gradual o abrupta. Sospecho que a pocas personas les preocupará la idea de que la humanidad evolucione poco a poco, en el transcurso de milenios, para volverse más inteligente y mejor adaptada al entorno cambiante, tal vez variando incluso de aspecto físico en el proceso. Por otra parte, muchos padres se enfrentarían a sentimientos contrapuestos si supieran que tener el hijo soñado les costaría la vida. Si la tecnología avanzada del futuro no nos reemplaza de golpe, sino que

nos moderniza y mejora de forma progresiva hasta fundirse a la larga con nosotros, nos permitirá conservar nuestras metas y nos brindará la gradación necesaria para que contemplemos las formas de vida posteriores a la singularidad como descendientes nuestras. Los teléfonos móviles e Internet ya han incrementado la capacidad humana para alcanzar lo que queremos sin alterar demasiado nuestros valores esenciales, y los optimistas de la singularidad creen que lo mismo ocurrirá con los implantes cerebrales, los dispositivos controlados por la mente y hasta la instauración completa de la mente humana en una realidad virtual.

Es más, eso podría lanzarnos al espacio, la última frontera. Al fin y al cabo, lo más probable es que una forma de vida extremadamente avanzada capaz de propagarse por todo este universo solo emerja en dos pasos: primero la evolución da lugar a seres inteligentes surgidos por selección natural, y después estos eligen ceder la antorcha de la vida creando consciencias más avanzadas, capaces de perfeccionarse solas. Libres de las limitaciones del cuerpo humano, estas formas de vida avanzada podrán alzarse y a la larga colonizar buena parte del universo observable, una idea tanteada desde hace mucho por autores de ciencia ficción, aficionados a la IA y pensadores transhumanistas.

En resumen, ¿habrá una singularidad dentro de unas pocas décadas? Y ¿debemos favorecerlo o evitarlo? Creo que es justo afirmar que no estamos nada cerca del consenso sobre ninguno de estos interrogantes, pero eso no significa que lo razonable sea no hacer nada al respecto. Podría ser lo mejor o lo peor que le haya ocurrido jamás a la humanidad, de modo que con que haya tan solo un 1 % de posibilidades de que se produzca una singularidad a lo largo de nuestra vida, creo que lo lógico sería tomar la precaución de dedicar al menos un 1 % del PIB a estudiar el asunto y decidir qué hacer. Pero ¿por qué no lo hacemos?

La estupidez humana: Una perspectiva cósmica

Mi profesión me ha brindado una perspectiva cósmica que hace que perciba más imperioso el control del riesgo existencial, tal como se sintetiza en la figura 13.5. Los docentes estamos obligados a poner notas y, si me tocara impartir la asignatura básica de Prevención de Riesgos y tuviera que asignar una calificación parcial a los humanos basándome en cómo hemos gestionado el riesgo existencial hasta ahora, no dude que nos pondría un notable bajo, porque andamos remoloneando y aún no hemos abandonado el curso. En cambio, desde mi perspectiva cosmológica considero lamentable nuestro

rendimiento, y no puedo darnos más que un simple aprobado: las posibilidades para la vida a largo plazo son literalmente astronómicas, pero los humanos no contamos con planes convincentes para afrontar siquiera los riesgos existenciales más apremiantes, y dedicamos una fracción minúscula de nuestra atención y nuestros recursos a dicha planificación. En comparación con los casi 20 millones de dólares estadounidenses que se destinaron el año pasado a la Unión de Científicos Preocupados (la UCS, del inglés Union of Concerned Scientists), una de las mayores asociaciones centradas en al menos algunos riesgos existenciales, Estados Unidos de América por sí solo gastó unas 500 veces más en cirugía plástica, alrededor de 1000 veces más en climatización de efectivos militares, unas 5000 veces más en cigarrillos, y unas 35 000 veces más en defensa, sin contar la atención sanitaria a militares, los costes de las jubilaciones de militares y los intereses de la deuda de defensa.

	Perspectiva habitual	**Perspectiva cósmica**
Humanos	Cúspide de la evolución	¡Aún no has visto nada!
Espacio	Obsesión por nuestro planeta	Un volumen disponible 10^{57} veces mayor
Tiempo	Obsesión por los próximos 50 años	Miles de millones de años disponibles
Nota parcial	Notable bajo	Suficiente

¡Inmensas posibilidades!

Probabilidad de extinción en una década de ~10^{-1} – 10^{-4}?

Figura 13.5: La importancia de gestionar el riesgo existencial de un modelo aceptable se vuelve más obvia desde una perspectiva cósmica, la cual subraya las inmensas posibilidades de futuro que podemos perder si malogramos y destruimos la civilización humana.

¿Por qué tenemos tan poca visión de futuro los humanos? Bueno, dado que la evolución nos preparó sobre todo para tratar con tecnologías como palos y piedras, tal vez lo que debería sorprendernos no es que nos manejemos tan mal con la tecnología moderna, sino que no nos vaya aún peor. Aquí estoy, sentado dentro de una caja enorme de madera y piedra, pulsando una y otra vez unos cuadraditos negros mientras fijo la vista en un rectángulo brillante que tengo frente a mí. Hoy no me he cruzado con un solo organismo vivo, y llevo horas aquí sentado, iluminado por una extraña espiral brillante situada sobre mí. El hecho de que a pesar de ello esté contento, evidencia la gran capacidad adaptativa del cerebro con el que nos ha dotado la evolución. Y lo mismo se deriva de que haya aprendido a interpretar los sinuosos signos

negros que aparecen en este rectángulo brillante como palabras que cuentan algo, o de que sepa calcular la edad del universo, puesto que ninguna de esas habilidades específicas tuvo relevancia alguna para la supervivencia de mis ancestros cavernícolas. Pero el mero hecho de que podamos hacer tantas cosas no significa que tengamos que hacerlas todas. Fuerzas ajenas a nosotros han ido modificando lo que nos rodea poco a poco a lo largo de los últimos cien mil años de la historia de la humanidad, y la evolución nos ha ayudado a adaptarnos al mismo ritmo. Pero recientemente hemos sido nosotros quienes hemos alterado el entorno, y demasiado rápido, además, para la evolución, y lo hemos complicado tanto que hasta a los expertos mundiales más eminentes les cuesta entender los limitados aspectos que los ocupan. De modo que no es de extrañar que a veces perdamos la visión de conjunto y demos más prioridad a satisfacciones a corto plazo que a la supervivencia de esta nave a largo plazo. Por ejemplo, la espiral brillante que tengo encima de la cabeza funciona quemando carbón para transformarlo en dióxido de carbono, lo que contribuye a sobrecalentar la nave y, ahora que lo pienso, hace mucho que debí apagarla.

La sociedad humana: una perspectiva científica

Por tanto, aquí estamos, dentro de la nave Tierra, rumbo a un cinturón de asteroides de riesgos existenciales sin ningún plan, y ni tan siquiera un capitán. Está claro que debemos hacer algo al respecto, pero ¿cuáles deben ser los objetivos, y cuál es la mejor manera de alcanzarlos? El *qué* es una cuestión de carácter ético, mientras que el *cómo* es un tema científico. Es obvio que ambos interrogantes son cruciales. Parafraseando a Einstein, «la ciencia sin ética está ciega; la ética sin ciencia está coja». Sin embargo (y este es un detalle que suele recalcar mi amigo Geoff Anders), hay algunas conclusiones éticas sobre las que existe un consenso casi universal (como que no tener una guerra atómica mundial es mejor que sí tenerla), y en cambio estamos haciendo una labor pésima para convertirlas en objetivos concretos y lograr un avance real. Por eso nos puse un simple aprobado en atenuación de riesgos existenciales, y no me parece justo culpar de este fracaso sobre todo a las dificultades éticas y al *qué*. Creo que más bien deberíamos comenzar por problemas en cuyos objetivos estamos más de acuerdo, como la supervivencia a largo plazo de nuestra civilización, y creo también que deberíamos seguir un planteamiento científico para decidir *cómo* alcanzar esos objetivos (uso el término *científico* en un sentido amplio, para enfatizar el empleo de la lógica). No basta con lanzar consignas como «hay que conseguir un cambio de

mentalidad a gran escala», necesitamos estrategias más concretas. Entonces ¿cómo deberíamos perseguir nuestras metas? ¿Cómo contribuir a que la humanidad sea menos miope a la hora de trazar su trayectoria futura? En definitiva, ¿cómo hacer que la razón cobre más peso en la toma de decisiones?

Los cambios que se producen en la sociedad humana derivan de un conjunto complejo de fuerzas que empujan en distintas direcciones y que a menudo se entorpecen entre sí. Desde una perspectiva física, la manera más sencilla de modificar un sistema complejo consiste en localizar una inestabilidad para que, al aplicar una fuerza pequeña, los efectos se multipliquen y logren una variación mayor. Por ejemplo, ya vimos que un pequeño empujón a un asteroide puede evitar que choque contra la Tierra una década después. De igual manera, la forma más fácil de que una sola persona repercuta en la sociedad es explotando una inestabilidad, tal como reflejan muchas metáforas basadas en la física: una idea puede «ser una chispa dentro de un barril de pólvora», «propagarse como el fuego», tener un «efecto dominó» o ejercer un «efecto bola de nieve descontrolada»[78]. Por ejemplo, para atajar el riesgo existencial de los asteroides letales, lo difícil será construir un sistema de cohetes deflectores de asteroides. Lo fácil consiste en gastar mucho menos dinero en desarrollar un sistema de alerta temprana sabiendo que, en cuanto haya información sobre un asteroide en trayectoria de colisión, será fácil conseguir dinero para el sistema de cohetes.

Creo que para convertir este planeta en un lugar mejor, muchas de las inestabilidades más fáciles de explotar implican la difusión de una información correcta. Para que la razón se imponga en la toma de decisiones, quienes las toman deben estar al tanto de la información relevante. Tal como ilustra la figura 13.6, para esto suelen necesitarse tres pasos, y los tres fallan a menudo: la información debe crearse/descubrirse, debe ser difundida por quien la descubre, y debe llegar a quien toma las decisiones. Una vez que los descubrimientos se difunden por el triángulo y se ponen en conocimiento de los demás, permiten descubrimientos adicionales y fomentan la expansión del conocimiento humano dentro de un círculo vicioso. Algunos descubrimientos tienen la ventaja añadida de que aportan eficacia al triángulo: la prensa escrita e Internet han facilitado de manera radical tanto la difusión como el acceso al conocimiento, mientras que el perfeccionamiento de detectores y computadoras ha ayudado enormemente a los investigadores. Sin embargo, aún hoy queda espacio para lograr grandes progresos en los tres eslabones del triángulo de información.

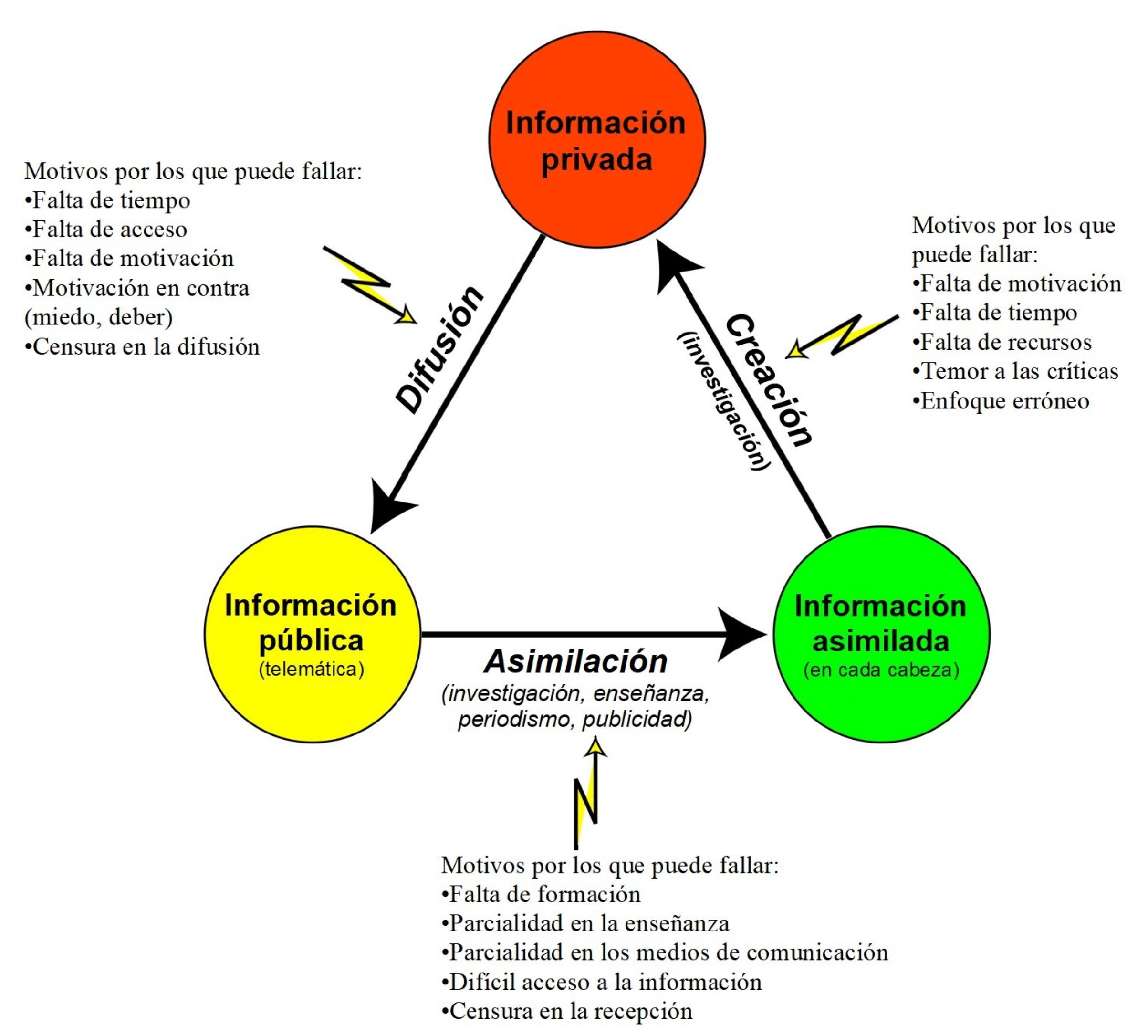


Figura 13.6: La información es crucial para que la razón prevalezca en la gestión de la sociedad. Cuando se descubre información importante, debe ponerse a disposición del público general y debe llegar a las personas para las que sea relevante.

Está claro que invertir en investigación científica y otras fuentes de información es positivo para la sociedad, al igual que las iniciativas para contrarrestar la censura y otras trabas para difundir la información. En cambio, en lo referente a explotar inestabilidades, creo que la fruta más accesible se encuentra en la flecha inferior de la figura 13.6: el aprendizaje. A pesar del éxito espectacular logrado por la investigación, tengo la sensación de que la comunidad científica mundial no ha cosechado nada más que un fracaso igual de espectacular en la tarea de concienciar a la población general y a quienes toman las decisiones. Los haitianos quemaron 12 «brujas» en 2010. Las encuestas revelan que el 39 % de la población estadounidense contempla la astrología como una ciencia, y el 46 % cree que la especie humana tiene menos de diez mil años de antigüedad. Si todo el mundo entendiera el significado de *concepto científico*, esos porcentajes ascenderían

a cero. Es más, el mundo sería un lugar mejor, porque la gente con un concepto científico de la vida, que basara sus decisiones en información correcta, elevaría al máximo sus posibilidades de éxito. Si compráramos y votáramos de manera racional, reforzaríamos el razonamiento científico en la toma de decisiones en empresas, asociaciones y gobiernos.

¿A qué se debe el inmenso fracaso de la comunidad científica? Creo que las respuestas se encuentran sobre todo en la psicología, la sociología y la economía. Para llevar un estilo de vida científico hay que recabar información y usarla, y ambas tareas tienen sus inconvenientes. Es evidente que hay más posibilidades de tomar la decisión correcta si estamos al tanto de todo el abanico de datos antes de llegar a una conclusión, pero hay muchas razones por las que la gente no recaba una información completa. Muchas personas no tienen acceso a ella (el 97 % de los afganos no tiene Internet y, según una encuesta realizada en 2010, el 92 % de ellos no se enteró de los atentados del 11-S). Mucha gente está demasiado saturada de obligaciones y distracciones como para buscarla. Muchos toman la información únicamente de aquellas fuentes que confirman sus ideas preconcebidas (por ejemplo, un sondeo de 2012 reveló que el 27 % de los estadounidenses cree que Barack Obama probablemente o sin duda nació en otro país). La información más valiosa puede resultar difícil de encontrar incluso para quienes tienen acceso a Internet y viven libres de la censura, enterrada bajo un alud de medios de comunicación acientíficos.

Después está lo que hacemos con la información que tenemos. La base de un estilo de vida científico consiste en cambiar de idea cuando nos topamos con una información que no concuerda con nuestras ideas, lo que evita la inercia intelectual, pero aún hay muchos dirigentes bien valorados que se aferran con terquedad a sus ideas, las cuales consideran «sólidas». Richard Feynman alabó la «desconfianza en los expertos» como un pilar de la ciencia, pero la mentalidad de rebaño y la fe ciega en las autoridades es generalizada. La lógica es la base del razonamiento científico, pero el pensamiento ilusorio, los miedos irracionales y otros sesgos cognitivos suelen imperar en la toma de decisiones.

¿Qué podemos hacer para fomentar un estilo de vida científico? La respuesta evidente es que hay que mejorar la formación. En algunos países, el hecho de contar con la educación más rudimentaria ya supondría un gran avance (menos de la mitad de los paquistaníes sabe leer). La cultura socava el fundamentalismo y la intolerancia, lo que reduce la violencia y la guerra. El refuerzo del peso de las mujeres contendría la pobreza y la explosión

demográfica. Sin embargo, hasta los países que ofrecen una educación universal son aún muy mejorables. Con mucha frecuencia los colegios parecen museos, más empeñados en reflejar el pasado que en modelar el futuro. El currículo debería dejar de estar desdibujado por el consenso y los grupos de presión y centrarse en las habilidades que exige este siglo para las relaciones, la salud, la anticoncepción, la gestión del tiempo, el pensamiento crítico y la detección de la propaganda. En el caso de los jóvenes, el aprendizaje de un idioma universal y de mecanografía debería dejar atrás el empeño en que aprendan a hacer divisiones largas y a escribir en cursiva. En la era de Internet, mi papel como profesor ha cambiado. Ya no soy necesario como vehículo de información: los alumnos la pueden descargar sin más por sí solos. Mi cometido consiste más bien en despertar en ellos un concepto científico de vida, la curiosidad y las ansias de saber más.

Pasemos ahora a la cuestión más interesante: ¿cómo hacer que *de verdad* arraigue y prolifere un estilo de vida científico? Gente muy razonable ha estado esgrimiendo argumentos parecidos en pos de una educación óptima desde mucho antes de que yo usara pañales, pero, en lugar de mejorar, la educación y la adhesión a un estilo de vida científico empeoran cada vez más en muchos países entre los que se cuenta Estados Unidos. ¿Por qué? Es evidente que hay fuerzas potentes que empujan en dirección opuesta, y lo hacen con más eficacia. Las empresas temerosas de que una comprensión mejor de ciertos temas científicos merme sus beneficios tienen un aliciente para enturbiar las aguas, al igual que los grupos religiosos radicales inquietos por que el cuestionamiento de sus postulados seudocientíficos les reste poder.

Entonces, ¿qué se puede hacer? Lo primero que debemos hacer los científicos es bajarnos del pedestal, admitir que nuestras tácticas de persuasión han fracasado, y desarrollar una estrategia mejor. Tenemos la ventaja de contar con los mejores argumentos, pero la coalición anticientífica tiene la ventaja de contar con más financiación. Sin embargo, y esto es una ironía dolorosa, ¡también sigue una organización más científica! Si una empresa quiere modificar la opinión pública para incrementar las ganancias, lanza un despliegue de herramientas comerciales científicas y altamente eficaces. ¿Qué piensa hoy la gente? ¿Qué queremos que piense mañana? ¿De qué miedos, inseguridades, esperanzas y otras emociones podemos beneficiarnos? ¿Cuál es la manera más rentable de hacerla cambiar de idea? Planificación de campaña. Lanzamiento. Hecho. ¿Mensaje demasiado simplificado o engañoso? ¿Descrédito desleal de la competencia? Es lo habitual cuando se publicita el último teléfono inteligente o una marca nueva

de cigarrillos, de modo que sería ingenuo pensar que esta coalición debería aplicar otro código de conducta cuando se enfrenta a la ciencia. Pero los científicos solemos adolecer de una ingenuidad hiriente y nos engañamos pensando que, precisamente porque tenemos la autoridad moral, de alguna manera podemos derrotar a esta coalición de fundamentalistas empresariales mediante estrategias científicas obsoletas. ¿Basándonos en qué razonamiento científico conseguiremos una diferencia significativa si nos limitamos a rezongar «no caeremos tan bajo» y «la gente tiene que cambiar» en los comedores universitarios, y a salmodiar estadísticas a los periodistas? En esencia, los científicos hemos estado diciendo: «Los tanques son malos, así que combatamos los tanques con espadas».

Para enseñar a la gente qué es un concepto científico y por qué el pensamiento científico mejorará su vida, debemos proceder de manera científica: necesitamos más organizaciones que aboguen por la ciencia y que usen todas las herramientas comerciales científicas y todos los instrumentos para conseguir financiación que emplea la coalición anticientífica. Debemos echar mano de muchos de los recursos que acharan a los científicos, desde anuncios publicitarios y alianzas con grupos de presión, hasta entrevistas de grupo para identificar las consignas con más gancho. No obstante, no hay que rebajarse tanto como para perder la honradez intelectual. Porque, en esta batalla, tenemos de nuestra parte el arma más poderosa de todas: los hechos.

Su futuro: ¿es usted insignificante?

Tras dedicar la mayoría de este libro a mirar lejos para analizar los niveles más distantes y abstractos de nuestra realidad física, en este último capítulo nos hemos ido acercando cada vez más a nosotros para hablar sobre el futuro de este universo y el futuro de la civilización humana. Acabemos regresando por completo para analizar qué significa todo ello para cada uno de nosotros: para usted y para mí.

El sentido de la vida

Como hemos visto, las ecuaciones matemáticas fundamentales que parecen gobernar nuestra realidad física no hacen ninguna referencia al significado, de modo que cabría afirmar que un universo desprovisto de vida no tiene ningún sentido en absoluto. A través de los humanos, y tal vez también de otras formas de vida distintas a la nuestra, este universo ha tomado consciencia de

sí mismo, y los humanos hemos creado los conceptos de *significado* o *sentido*. Por tanto, desde este punto de vista, *el universo no da sentido a la vida, sino que la vida da sentido al universo*.

Aunque la pregunta «¿Cuál es el sentido de la vida?» se puede interpretar de muchas maneras, algunas de ellas demasiado vagas en ocasiones como para tener una respuesta bien definida, hay una interpretación muy práctica y concreta: «¿Por qué querría seguir viviendo?». La gente que sé que le ve sentido a la vida suele alegrarse de despertarse por la mañana e ilusionarse con el día que tiene por delante. Cuando pienso en estas personas me da la impresión de que pueden dividirse en dos grandes grupos dependiendo de dónde encuentren la felicidad y el sentido de la vida. En otras palabras, el problema del significado parece tener dos soluciones distintas que funcionan bastante bien al menos con algunas personas. Veo estas soluciones como «descendente» y «ascendente».

En la solución descendente, la satisfacción viene de arriba, del cuadro general. Aunque la vida aquí y ahora pueda ser desagradable, tiene sentido porque forma parte de algo mayor y más significativo. Muchas religiones representan este mensaje, al igual que las familias, organizaciones y sociedades que instan a los individuos a sentirse parte de algo más grandioso y más significativo que trasciende la individualidad.

En la solución ascendente, la satisfacción proviene de las cosas pequeñas que ocurren aquí y ahora. Si atrapamos el momento y encontramos la plenitud que necesitamos en la belleza de las florecillas de la cuneta, en ayudar a un amigo o en cruzar la mirada con un recién nacido, entonces nos sentimos agradecidos de estar vivos aunque el cuadro general implique elementos menos gratos como que la Tierra acabe vaporizada por el Sol moribundo y que este universo esté abocado a desaparecer a la larga.

A mí la solución ascendente me da razones de ser más que suficientes, y percibo los elementos descendentes que estoy a punto de defender como una mera bonificación adicional. Para empezar, me impresiona sobremanera que un conglomerado de partículas pueda ser consciente de sí mismo, y el hecho de que ese conglomerado particular que es Max Tegmark haya tenido la suerte de conseguir el alimento, el cobijo y el tiempo libre necesarios para maravillarse con el universo circundante, me colma de un sentimiento de gratitud inefable.

¿Por qué habría de importarnos nuestro universo?

Además, el pensamiento descendente me motiva e inspira sobre las posibilidades de futuro de la vida en este universo, de las que ya hablamos por extenso en este capítulo. Pero si existen universos paralelos donde se dan todos los futuros físicamente posibles, ¿por qué habría de importarnos este universo en particular? Si todos los desenlaces acabarán sucediendo, ¿por qué inquietarnos por las decisiones que tomemos? Es más, ¿por qué habríamos de levantar un solo dedo o preocuparnos por nada en absoluto si el multiverso del nivel IV existe y hasta la mudanza en sí es una ilusión? Debemos elegir entre dos alternativas racionales:

1. Al menos hay algo que nos importa y, por tanto, seguimos adelante y vivimos la vida tomando decisiones lógicas que revelan qué cosas nos preocupan.
2. No hay nada que nos importe y, por tanto, no hacemos nada en absoluto o actuamos al azar.

Tanto usted como yo ya hemos elegido la opción 1. A mí me parece la más inteligente.

Pero esta elección tiene consecuencias lógicas. Cuando pienso en la gente que me importa, me parece lógico que también me preocupen la civilización, el planeta y el universo a los que pertenecen. En cambio, parece lógico que me desvelen menos otros universos, porque las decisiones que tomo aquí en este universo no pueden, por definición, ejercer ningún efecto sobre ellos (así que tampoco les afectan mis preocupaciones). Siguiendo esta lógica, limitemos lo que resta de disertación a este universo y analicemos qué función desempeñamos en él.

¿Somos insignificantes?

Cuando se alza la mirada al cielo en noches despejadas, es fácil sentirse insignificante. Cuanto más he ido sabiendo a lo largo de la vida sobre la inmensidad del cosmos y el lugar que ocupamos dentro de él, más insignificante me he sentido. ¡Pero ya no!

Desde que nuestros primeros ancestros admiraron las estrellas, el ego humano ha sufrido una serie de reveses. Para empezar, somos más pequeños de lo que creíamos. Como vimos en la primera parte de este libro, Eratóstenes reveló que la Tierra es mayor que millones de humanos, y sus compatriotas helénicos repararon en que el Sistema Solar es aún miles de veces mayor. Pero, a pesar de su grandeza, el Sol resultó no ser más que una estrella común

entre cientos de miles de millones más, dentro de una galaxia que a su vez no es más que una de los cientos de miles de millones de galaxias que existen en el universo observable, la región esférica desde donde la luz ha tenido tiempo de alcanzarnos durante los catorce mil millones de años transcurridos desde nuestra Gran Explosión. La pequeñez de nuestra vida es tanto temporal como espacial: si trasladáramos esta historia cósmica de catorce mil millones de años a la escala temporal de un solo año, entonces los cien mil años de historia humana se convertirían en cuatro minutos y una vida de cien años se traduciría a dos décimas de segundo. Para seguir bajándonos los humos, hemos sabido que tampoco es que seamos muy especiales. Darwin nos enseñó que somos animales; Freud nos reveló que somos irracionales; en la actualidad, las máquinas nos superan en cuanto a fuerza e inteligencia jugando al ajedrez o al programa de preguntas y respuestas *Jeopardy!* Para colmo de males, los cosmólogos han descubierto que ni siquiera estamos hechos de la sustancia que más abunda.

Cuanto más descubrimos al respecto, menos importantes nos sentimos. Pero de pronto cambié de opinión y me volví más optimista acerca de nuestra relevancia cósmica. ¿Por qué? Pues porque ahora pienso que el desarrollo de vida avanzada es algo muy singular, pero tiene unas posibilidades inmensas de futuro, lo que confiere una trascendencia extraordinaria al lugar y al tiempo en que nos encontramos.

¿Estamos solos?

Cuando doy conferencias sobre cosmología, suelo pedir a los asistentes que levanten la mano si creen que hay vida inteligente en otros lugares del universo. Nunca falla: casi todo el mundo dice que sí, desde pequeños en edad preescolar hasta estudiantes universitarios. Cuando pregunto por qué, la respuesta suele ser que el espacio es tan inmenso que tiene que haber vida en algún otro lugar, aunque solo sea por una razón estadística. Pero ¿es correcto este argumento en realidad? Creo que no, y le voy a explicar por qué.

Tal como señaló el astrónomo estadounidense Francis Drake, la probabilidad de que haya vida inteligente en un lugar determinado se puede calcular multiplicando la probabilidad de que tenga un entorno habitable (por ejemplo, un planeta óptimo) por la probabilidad de que se haya desarrollado la vida en él y por la probabilidad de que esa vida haya evolucionado hasta volverse inteligente. Cuando era estudiante de posgrado, no teníamos ninguna pista sobre ninguna de estas tres probabilidades. Tras los espectaculares hallazgos de planetas en órbita alrededor de otras estrellas en la década

pasada, ahora parece probable que los planetas habitables abundan, y que solo en nuestra Galaxia hay miles de millones de ellos. En cambio, la probabilidad de que hayan desarrollado vida e inteligencia es dudosa en extremo: algunos expertos creen que una o ambas posibilidades son bastante inevitables y se dan en la mayoría de los planetas habitables, mientras que otros piensan que una o ambas posibilidades son muy improbables debido a uno o más cuellos de botella evolutivos que requieren un gran golpe de suerte para atravesarlos. Algunos obstáculos propuestos implican problemas como el del huevo y la gallina en las primeras etapas de la vida autorreproductiva: por ejemplo, para que una célula actual produzca un ribosoma (la complejísima máquina molecular que lee el código genético y crea las proteínas), necesita otro ribosoma, y no es obvio que el primer ribosoma experimentara una evolución gradual a partir de algo más simple. Otros cuellos de botella propuestos guardan relación con el desarrollo de inteligencia superior. Por ejemplo, aunque los dinosaurios dominaron la Tierra durante más de cien millones de años, un periodo temporal mil veces mayor que el que llevamos existiendo los humanos modernos, la evolución no pareció empujarlos de forma inevitable hacia el desarrollo de una inteligencia superior para inventar telescopios o computadoras.

En otras palabras, creo que podemos afirmar sin equivocarnos que aún no tenemos ninguna pista sobre qué fracción de todos los planetas existentes alberga vida inteligente: *a priori*, sin observar y examinar otros planetas, cualquier orden de magnitud que se proponga será tan bueno como cualquier otro. Esta es la manera habitual de crear modelos con una incertidumbre tan extrema en ciencia, y recibe el nombre de *prior logarítmico uniforme*, en lenguaje llano significa que hay las mismas probabilidades aproximadas de que la fracción de planetas con vida inteligente ascienda a uno entre 1000, que a uno entre un millón, que a uno entre 1000 millones, que a uno entre un billón, que a uno entre un trillón, etc.

Teniendo esto en cuenta, ¿a qué distancia se encuentra la civilización inteligente más cercana? A partir de la afirmación anterior se deriva que esa distancia también tiene un prior logarítmico uniforme, así que, *a priori*, antes de mirar, hay más o menos la misma probabilidad de que la respuesta sea 10^{10} metros, 10^{20} metros, 10^{30} metros, 10^{40} metros, etc., tal como ilustra la figura 13.7.

Veamos ahora qué sabemos a partir de la observación. Hasta ahora, las búsquedas astronómicas directas no han revelado ningún signo de inteligencia extraterrestre, y no existe ningún indicio que goce de una aceptación general

de que la Tierra haya recibido la visita de alienígenas. Mi interpretación personal de esto es que la fracción de planetas que albergan inteligencia es minúscula, y que lo más probable es que no haya vida con inteligencia superior en unos 10^{21} metros a la redonda, es decir, dentro de la Galaxia o en sus inmediaciones. Baso esta conclusión en varios supuestos:

- La colonización interestelar es posible desde un punto de vista físico y se alcanzaría con facilidad si una civilización tan avanzada como la nuestra dispusiera de un millón de años para desarrollar la tecnología necesaria.
- Hay miles de millones de planetas habitables en la Galaxia, muchos de los cuales se formaron, no solo millones de años, sino miles de millones de años antes que la Tierra.
- Una fracción nada despreciable de las civilizaciones capacitadas para colonizar el espacio optaría por hacerlo.

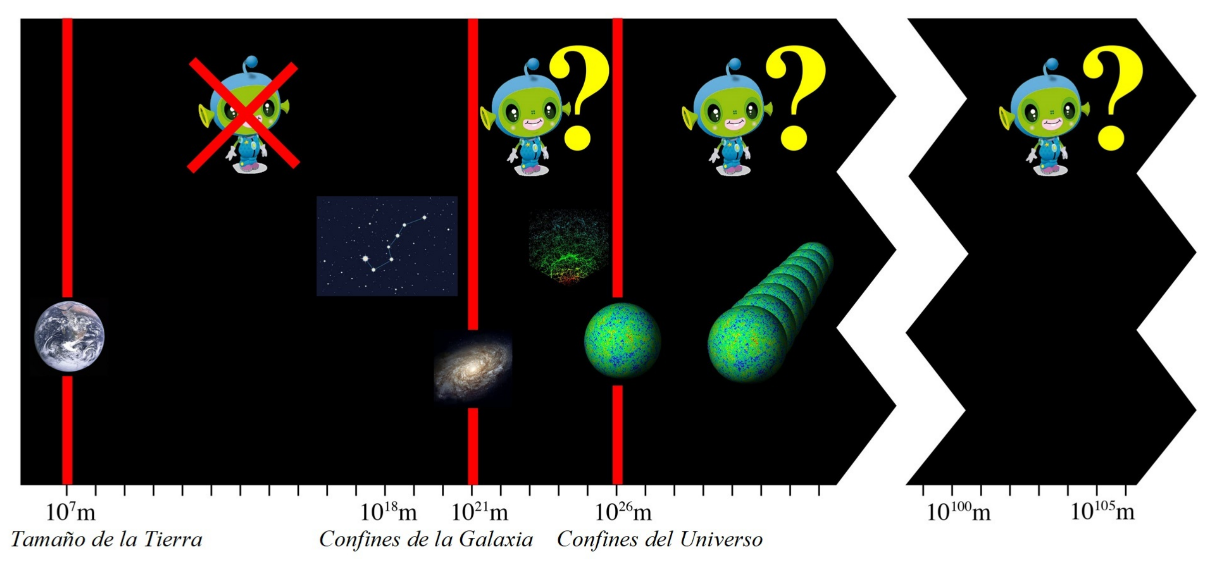


Figura 13.7: ¿Estamos solos? Las enormes incertidumbres sobre cómo se desarrolló la vida y la inteligencia sugieren que la civilización más próxima en el espacio casi tiene las mismas probabilidades de hallarse en cualquier lugar a lo largo del eje horizontal de esta gráfica, lo que torna muy improbable que se encuentre entre los confines de nuestra Galaxia (a unos 10^{21} metros de distancia) y los confines de nuestro universo (unos 10^{26} metros de distancia). Si estuviera mucho más cerca que ese intervalo, habría tantas civilizaciones avanzadas en la Galaxia que ya lo habríamos notado, lo que insta a pensar que en realidad estamos solos en el universo.

Para el primer supuesto parto de una idea amplia sobre la tecnología que podría emplearse. Por ejemplo, en lugar de enviar al espacio organismos grandes, de dimensiones humanas, tal vez sea más eficaz mandar enjambres de pequeñas nanosondas capacitadas para autoensamblarse, que construyan factorías al desembarcar, y que monten cualquier forma de vida más grande usando instrucciones transmitidas a la velocidad de la luz a través de la

radiación electromagnética[79]. Entre las objeciones más frecuentes al tercer supuesto figura la hipótesis de que las civilizaciones avanzadas sean buenas por naturaleza o no se interesen por la colonización, tal vez porque su avanzada tecnología les permita alcanzar todas sus metas con los recursos que ya tienen. Otra posibilidad es que prefieran pasar inadvertidas para protegerse o por otras razones, o que colonicen de un modo imperceptible: el astrónomo estadounidense John A. Ball ha llamado a esto la *hipótesis del zoo* y aparece en clásicos de la ciencia ficción como *Hacedor de estrellas*[80], de Olaf Stapledon. Creo que no deberíamos subestimar la diversidad de las civilizaciones avanzadas dando por supuesto que todas comparten los mismos objetivos: basta con que *una* civilización decida colonizar abiertamente todo lo que pueda, para que se extienda por toda la Galaxia y más allá. Ante un riesgo así, hasta las civilizaciones sin ningún interés por la colonización se sentirán impelidas a expandirse por protección.

Si mi interpretación es correcta, la civilización más cercana se encuentra a unos 1 000 000 … 000 metros de distancia, donde probablemente dará más o menos igual que el total de ceros ascienda a 21, 22, 23, … 100, 101, 102, etc., pero no será muy inferior a 21. Sin embargo, para que esa civilización esté en este universo, cuyo radio mide unos 10^{26} metros, la cantidad de ceros no puede pasar de 26, y la probabilidad de que el número de ceros caiga en la estrecha franja entre 22 y 26 es bastante reducida. Por eso creo que estamos solos en el universo.

¿De verdad somos insignificantes?

Acabo de explicar que probablemente somos la forma de vida más inteligente de todo este universo. Solo una minoría[81] piensa así, y es muy posible que esté equivocado, pero, como mínimo, es una posibilidad que no podemos descartar de momento. Así que exploremos las implicaciones que tendría si fuera cierta y fuéramos la única civilización de este universo que se ha desarrollado hasta el punto de construir telescopios.

Fue la inmensidad del espacio lo que me hizo sentir insignificante al principio. Pero esas grandiosas galaxias son visibles y hermosas para nosotros y nada más que para nosotros. Solo nosotros les damos algún sentido, lo que convierte este planeta en el lugar más significativo de todo el universo observable. Si no existiéramos, todas esas galaxias no serían más que un desperdicio de espacio gigantesco y sin ningún significado.

También sentí que mi corta vida parecía insignificante al compararla con la inmensidad del tiempo cósmico. Sin embargo, el breve siglo en el que

vivimos seguramente es el más trascendente de toda la historia de este universo: el siglo en el que se decidirá el sentido de su futuro. Tendremos la tecnología necesaria tanto para autodestruirnos como para diseminar la vida por el cosmos. La situación es tan inestable que dudo que podamos seguir en esta encrucijada más de un siglo más. Si acabamos tomando la senda de la vida y no la de la muerte, entonces, en un futuro lejano, este cosmos rebosará de vida con un único origen: lo que hagamos aquí y ahora. No tengo ni idea de cómo nos imaginarán, pero estoy seguro de que no nos recordarán como insignificantes.

En este libro hemos analizado nuestra realidad física y, a través de los ojos de la ciencia, hemos contemplado un universo de una belleza sobrecogedora que a través de nosotros, los humanos, ha cobrado vida y ha empezado a tener consciencia de sí mismo. Hemos visto que las posibilidades de futuro de la vida en este universo dejan muy atrás los sueños más desenfrenados de nuestros ancestros, si bien quedan matizadas por unas posibilidades igual de reales de que la vida inteligente se extinga para siempre. ¿Aprovechará la vida de este universo ese potencial o lo malgastará? Creo que eso se decidirá a lo largo de nuestra vida aquí, en la nave Tierra, por usted, por mí y por el resto de los pasajeros que nos acompañan. ¡Tomemos parte!

SUMARIO

- Aunque las dos expediciones intelectuales que emprendimos partieron en direcciones opuestas, hacia lo grande y hacia lo pequeño, acabamos llegando al mismo sitio: al reino de las estructuras matemáticas.
- A las escalas más grandes y más pequeñas, el tejido matemático de la realidad se torna evidente, pero es fácil pasarlo por alto a las escalas intermedias que solemos notar los humanos.
- Si el tejido último de la realidad es de verdad matemático, entonces todo es descifrable en principio para nosotros, y lo único que nos limitará será nuestra propia imaginación.
- Aunque el multiverso del nivel IV sea eterno, nuestro universo particular podría acabar con un Gran Frío, una Gran Implosión, una Gran Fuga, una Gran Disgregación o con Burbujas Mortales.
- Hay indicios para pensar que no hay otras formas de vida tan avanzadas como los humanos en todo este universo.

- Desde una perspectiva cósmica, las posibilidades de futuro de la vida en este universo son mucho mayores de lo que hemos visto hasta ahora.
- Sin embargo, los humanos apenas dedicamos atención y recursos a los riesgos existenciales que amenazan la vida tal como la conocemos, incluidas la guerra nuclear accidental y la inteligencia artificial hostil.
- Aunque parezca fácil sentirse insignificantes en medio de este inmenso cosmos, todo el futuro de la vida en nuestro universo se decidirá en nuestro planeta durante el intervalo temporal de quienes vivimos ahora: usted, yo y el resto de los pasajeros que nos acompañan dentro de la nave Tierra. ¡Tomemos parte!

Agradecimientos

Además de los agradecimientos que manifesté en el prólogo, me siento en deuda con las organizaciones cuyas investigaciones han contribuido a los descubrimientos que he descrito a lo largo de esta obra: NASA, la Fundación Nacional para la Ciencia de EE. UU., la Fundación Packard, la Corporación de Estudios para el Avance de la Ciencia (RCSA) de EE. UU., la Universidad de Pensilvania y el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). También quisiera expresar mi agradecimiento a Jonathan Rothberg y a otra persona anónima, por el generoso apoyo que brindaron al proyecto del omniscopio.

Lecturas recomendadas

Este libro se basa en un Corpus inmenso de trabajos realizados por la comunidad científica. La mayoría de ellos están publicados en forma de artículos para revistas técnicas, y todos mis artículos especializados están en **http://space.mit.edu/home/tegmark/technical.html**. Sin embargo, también existe gran cantidad de obras destinadas a un público general que explican las ideas centrales de este libro. Aparte de las referencias bibliográficas que he ido mencionando en las notas al pie, en este apartado incluyo una pequeña selección, de entre las numerosas y fantásticas obras que se han escrito, para quien desee ahondar en los temas tratados aquí. He intentado agruparlas por temas a pesar de que muchas abarcan varios a la vez. Un símbolo o más de integrales (∫) indica que se trata de un libro más técnico/matemático, del mismo modo que el símbolo de la guindilla advierte sobre las comidas picantes en las cartas de los restaurantes[82].

COSMOLOGÍA (CAPÍTULOS 2–4)

Adams, Fred, y Greg Laughlin. *The Five Ages of the Universe*. Nueva York: The Free Press, 1999.

Chown, Marcus. *The Magic Furnace: The Search for the Origins of Atoms*, Nueva York: Oxford University Press, 2001.

De Grasse Tyson, Neil. *Death by Black Hole: And Other Cosmic Quandaries*. Nueva York: W. W. Norton & Company, 2007.

Finkbeiner, Ann. *A Grand and Bold Thing: An Extraordinary New Map of the Universe Ushering in a New Era of Discovery*. Nueva York: Free Press, 2010.

Greene, Brian. *El tejido del cosmos: espacio, tiempo y la textura de la realidad*. Trad. de Javier García Sanz. Barcelona: Crítica, 2006.

Hawking, Stephen. *Brevísima historia del tiempo*. Trad. de David Jou. Barcelona: Crítica, 2010.

Kirshner, Robert P. *El universo extravagante: estrellas explosivas, energía oscura y cosmos acelerado*. Trad. de Luis Enrique de Juan. Madrid: Siruela, 2006.

Kragh, Helge. *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton: Princeton University Press, 1996.

Krauss, Lawrence. *Un Universo de la nada: ¿por qué hay algo en vez de nada?* Trad. de Cecilia Belzay Gonzalo García. Barcelona: Pasado & Presente, 2013.

Rees, Martin. *Seis números nada más: las fuerzas profundas que ordenan el Universo*. Trad. de Fernando Velasco. Madrid: Debate, 2001.

Rees, Martin. *Nuestro hábitat cósmico*. Trad. de Joandoménec Ros. Barcelona: Paidós, 2002.

Seife, Charles. *Alpha and Omega: The Search for the Beginning and End of the Universe*. Nueva York: Penguin Books, 2004.

Singh, Simon. *Big Bang: The Origin of the Universe*. Nueva York: HarperCollins, 2004.

Smolin, Lee. *Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe*. Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2013.

Weinberg, Steven. *Los tres primeros minutos del universo: una concepción moderna del origen del universo*. Trad. de Néstor Míguez. Madrid: Alianza, 2009.

INFLACIÓN, MULTIVERSOS DE LOS NIVELES I-II (CAPÍTULOS 5-6)

Barrow, John. *El libro de los universos*. Trad. de Francesc Pedrosa. Barcelona: Crítica, 2012.

Davies, Paul. *Cosmic Jackpot: Why Our Universe Is Just Right for Life*. Nueva York: Houghton Mifflin, 2007.

Guth, Alan. *El universo inflacionario: la búsqueda de una nueva teoría sobre los orígenes del cosmos*. Trad. de Fabián Chueca. Madrid: Debate, 1999.

∫∫ Linde, Andrei D. *Particle Physics and Inflationary Cosmology*. Chur, Suiza: Harwood Academic Publishers, 1990.

Steinhardt, Paul J., y Neil Turok. *Endless Universe: Beyond the Big Bang*. Nueva York: Doubleday, 2007.

Susskind, Leonard. *El paisaje cósmico: teoría de cuerdas y el mito del diseño inteligente*. Trad. de Javier García Sanz. Barcelona: Crítica, 2007.

Vilenkin, Alexander. *Many Worlds in One: The Search for Other Universes*. Nueva York: Hill and Wang, 2006.

MECÁNICA CUÁNTICA, MULTIVERSO DEL NIVEL III (CAPÍTULOS 7-8)

Byrne, Peter. *The Many Worlds of Hugh Everett III: Multiple Universes, Mutual Assured Destruction, and the Meltdown of a Nuclear Family*. Nueva York: Oxford University Press, 2010.

Cox, Brian, y Jeff Forshaw. *The Quantum Universe (And Why Anything That Can Happen, Does)*. Boston: Da Capo Press, 2012.

Deutsch, David. *The Beginning of Infinity: Explanations That Transform Our World*. Nueva York: Allen Lane, 2012.

Deutsch, David. *La estructura de la realidad*. Trad. de David Sempau. Barcelona: Anagrama, 1999.

∫∫ Everett, Hugh. «The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics». Tesis doctoral, Universidad de Princeton, 1957. En **http://www.pbs.org/wgbh/nova/manyworlds/pdf/dissertation.pdf**.

∫∫ Everett, Hugh. *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, edición de Bryce S. DeWitt y Neill Graham. Princeton: Princeton University Press, 1973.

∫∫ Giulini, Domenico, y Erich Joos, Claus Kiefer, Joachim Kupsch, Ion-Olimpiu Stamatescu y H. Dieter Zeh. *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*. Berlín: Springer, 1996.

Kaiser, David. *How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival*. Nueva York: W. W. Norton *8c* Company, 2011.

∫ Saunders, Simon, y Jonathan Barrett, Adrian Kenty David Wallace. *Many Worlds? Everett, Quantum Theory Reality*. Oxford: Oxford University Press, 2010.

MULTIVERSOS EN GENERAL (CAPÍTULOS 6 y 8)

∫ Carr, Bernard J., de. *Universe or Multiverse?* Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2007.

Carroll, Sean. *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*. Oxford: Oneworld Publications, 2011.

Greene, Brian. *La realidad oculta: universos paralelos y las profundas leyes del cosmos*. Trad. de Javier García Sanz. Barcelona: Crítica, 2011.

Kaku, Michio. *Universos paralelos: los universos alternativos de la ciencia y el futuro del cosmos*. Trad. de Dolors Udina. Girona: Atalanta, 2008.

Lewis, David. *On the Plurality of Worlds*. Oxford: Blackwell Publishing, 1986.

LA MENTE (CAPÍTULOS 9 Y 11)

Blackmore, Susan. *Conversaciones sobre la conciencia*. Trad. de Francesc Forn. Barcelona: Paidós, 2010.

Bostrom, Nick. *Anthropic Bias: Observation Selection Effects in Science and Philosophy*. Nueva York: Routledge, 2002.

Damasio, Antonio. *La Sensación de lo que ocurre: cuerpo y emoción en la construcción de la conciencia*. Trad. de Francisco Páez. Madrid: Debate, 2001.

Damasio, Antonio. *Y el cerebro creó al hombre: ¿Cómo pudo el cerebro generar emociones, sentimientos, ideas y el yo?* Trad. de Ferran Meler Ortí. Barcelona: Destino, 2010.

Dennett, Daniel. *Consciousness Explained*. Boston: Little, Brown and Company, 1992.

Hawkins, Jeff, y Sandra Blakeslee. *Sobre la inteligencia*. Trad. de Carmen Martínez Gimeno. Pozuelo de Alarcón: Espasa Calpe, 2005.

Hut, Piet, Mark Alford y Max Tegmark. «On Math, Matter a Mind», *Foundations of Physics*, 15 de enero de 2006, **http://arxiv.org/pdf/physics/0510188.pdf**.

Koch, Christof. «A ‘Complex’ Theory of Consciousness», *Scientific American*, 18 de agosto de 2009, **http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=a-theory-of-consciousness**.

Koch, Christof. *La consciencia: una aproximación neurobilógica*. Barcelona: Ariel, 2005.

Kurzweil, Ray. *How to Create a Mind: The Secret of human Thought Revealed*. Nueva York: Viking Penguin, 2012.

Penrose, Roger. *La nueva mente del emperador*. Trad. de Javier García Sanz. Barcelona: DeBolsillo, 2009.

Pinker, Steven. *Cómo funciona la mente*. Trad. de Ferran Meler Ortí. Barcelona: Destino, 2008.

Tononi, Giulio. «Consciousness as Integrated Information: A Provisional Manifesto», *The Biological Bulletin*, 2008, **http://www.biolbull.org/content/215/3/216.full**.

Tononi, Giulio. *Phi: A Voyage from the Brain to the Soul*. Nueva York: Pantheon Books, 2012.

Velmans, Max, y Susan Schneider, eds. *The Blackwell Companion to Consciousness*. Malden, Massachusetts: Blackwell Publishing, 2007.

MATEMÁTICAS, COMPUTACIÓN, COMPLEJIDAD (CAPÍTULOS 10-12)

Barrow, John D. *La trama oculta del universo: contar, pensar y existir*. Trad. de Javier García Sanz. Barcelona: Crítica, 1996.

Barrow, John D. *Teorías del todo: hacia una explicación fundamental del universo*. Trad. de Rosa Álvarez. Barcelona: Crítica, 2004.

Chaitin, Gregory J. *Algorithmic Information Theory*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

Davies, Paul. *La mente de Dios: la base científica para un mundo racional*. Trad. de Lorenzo Abellanas Rapun. Madrid: McGraw-Hill, 1993.

∫ Goodstein, Reuben L. *Constructive Formalism: Essays on the Foundations of Mathematics*. Leicester: Leister University College Press, 1951.

Hersh, Reuben. *What Is Mathematics, Really?* Oxford: Oxford University Press, 1999.

Levin, Janna. *A Madman Dreams of Turing Machines*. Nueva York: Anchor Books, 2007.

Livio, Mario. *¿Es Dios un matemático?* Trad. de Francesc Pedrosa. Barcelona: Ariel, 2009.

Lloyd, Seth. *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*. Nueva York: Vintage Books, 2007.

Rucker, Rudy. *Infinity and the Mind*. Boston: Birkhäuser, 1982.

Standish, Russell K *Theory of Nothing*. Charleston, Carolina del Sur: BookSurge, 2006.

∫ Wolfram, Stephen. *A New Kind of Science*. Nueva York: Wolfram Media, 2002.

EL FUTURO DE LA VIDA (CAPÍTULO 13)

Bostrom, Nick, y Milan Cirkovic, eds. *Global Catastrophic Risks*. Oxford: Oxford University Press, 2008.

Davies, Paul. *Un silencio inquietante: la nueva búsqueda de inteligencia extraterrestre*. Trad. de Joan Lluís Riera Rey. Barcelona: Crítica, 2011.

Drexler, K. Eric. *La nanotecnología: el surgimiento de las máquinas de creación*. Trad. de José Angel Alvarez. Barcelona: Gedisa, 1993.

Dyson, Freeman. *A Many-Colored Glass: Reflections on the Place of Life in the Universe*. Charlottesville: University of Virginia Press, 2007.

Fuller, R. Buckminster. *Operating Manual for Spaceship Earth*. Buckminster Fuller Institute, **http://bfi.org/about-bucky/resources/books/operating-manualspaceship-earth**.

Gribbin, John R. *Solos en el universo: el milagro de la vida en la Tierra*. Trad. de Efrén del Valle. Barcelona: Pasado & Presente, 2012.

Kurzweil, Ray. *La era de las máquinas espirituales*. Trad. de Marco Aurelio Galmarini. Barcelona: Planeta, 1999.

Kurzweil, Ray. *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. Nueva York: Viking, 2005.

Kurzweil, Ray, y Terry Grossman. *Transcend: Nine Steps to Living Well Forever*. Nueva York: Viking, 2010.

Moravec, Hans. *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind*. Oxford: Oxford University Press, 1999.

Rees, Martin. *Nuestra hora final*. Trad. de Joan Lluís Riera Rey. Barcelona: Crítica, 2004.

Sagan, Carl. *Un punto azul pálido: una visión del futuro humano en el espacio*. Trad. de Marina Widmer Caminal. Barcelona: Planeta, 2006.

FÍSICA FUNDAMENTAL, TEORÍA DE CUERDAS, GRAVITACIÓN CUÁNTICA

Barbour, Julian. *The End of Time: The Next Revolution in Physics*. Oxford: Oxford University Press, 1999.

∫ Barrow, John D., y Frank J. Tipler. *The Anthropic Cosmological Principle*. Oxford: Clarendon Press, 1986.

Carroll, Sean. *La partícula al final del universo: del bosón de Higgs al umbral de un nuevo mundo*. Trad. de Marcos Pérez Sánchez. Barcelona: Debate, 2013.

∫ Einstein, Albert. *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Trad. de Miguel Paredes Larrucea. Madrid: Alianza, 2011.

∬ Feynman, Richard, Robert Leighton y Matthew Sands. *Física*. 3 vols. Trad. de Enrique Oelker [*et al.*]. México: Pearson Educación, 1998.

Gamow, George. *El breviario del señor Tompkins*. Trad. de Francisco González Aramburo. México D.F.: Fondo de Cultura Económica, 1985.

Greene, Brian. *El universo elegante: supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final*. Trad. de Mercedes García Garmilla. Barcelona: Crítica, 2012.

Musser, George. *The Complete Idiot's Guide to String Theory*. Nueva York: Penguin Group, 1998.

∬ Penrose, Roger. *El camino a la realidad: una guía completa de las leyes del universo*. Javier García Sanz. Barcelona: Debate, 2007.

Randall, Lisa. *Universos ocultos: un viaje a las dimensiones extras del cosmos*. Trad. de Eugenio Jesús Gómez Ayala. Barcelona: Acantilado, 2011.

Smolin, Lee. *Three Roads to Quantum Gravity*. Nueva York: BasicBooks, 2001.

Smolin, Lee. *Las dudas de la física en el siglo XXI: ¿es la teoría de cuerdas un callejón sin salida?* Trad. de Rosa M. Salleras Puig. Barcelona: Crítica, 2007.

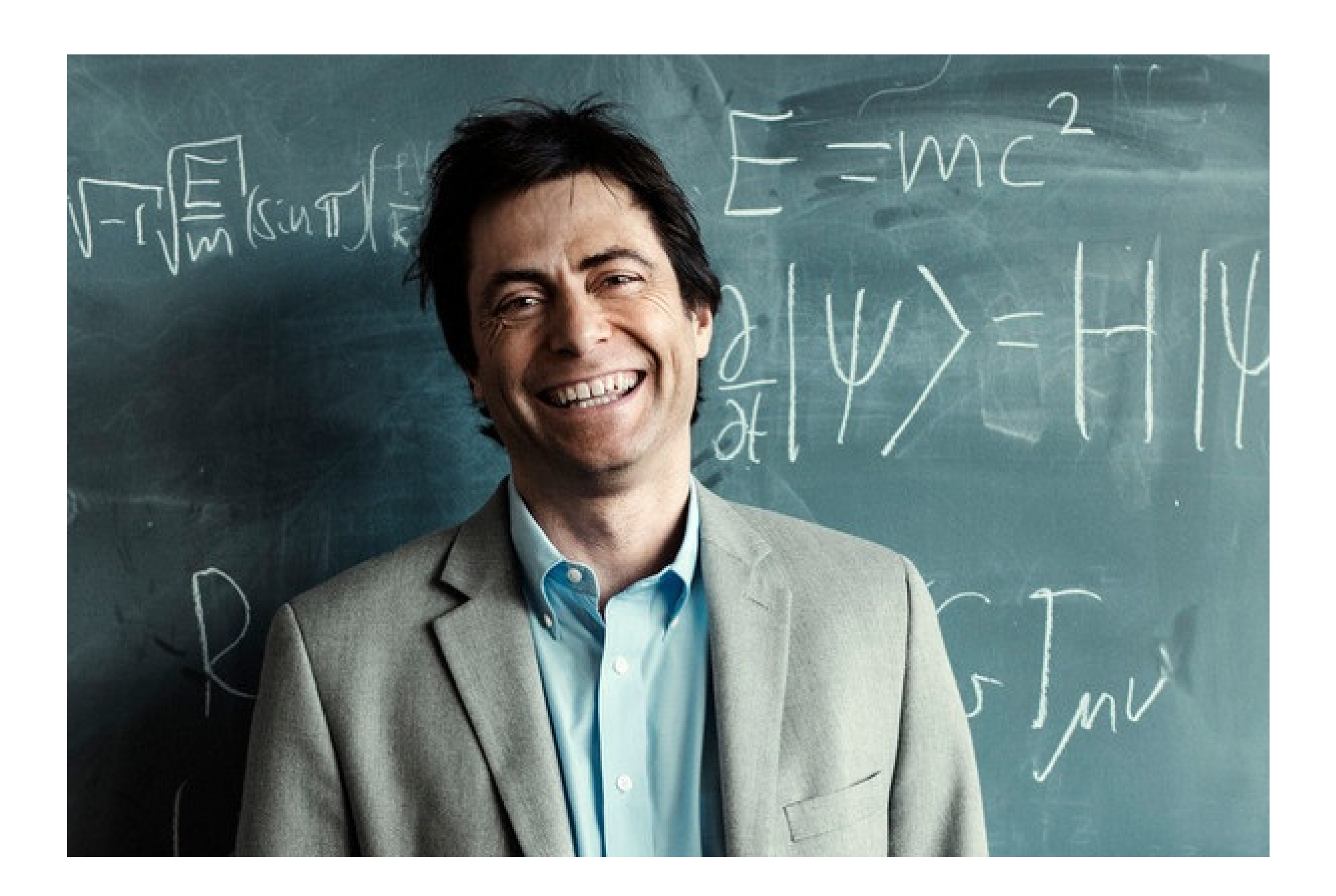
Susskind, Leonard. *La guerra de los agujeros negros: una controversia científica sobre las leyes últimas de la naturaleza*. Trad. de Javier García Sanz. Barcelona: Crítica, 2009.

Weinberg, Steven L. *El sueño de una teoría final: la búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza*. Trad. de José Javier García Sanz. Barcelona: Crítica, 2003.

Wigner, Eugene P. *Symmetries and Reflections*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1967.

Wilczek, Frank. *La ligereza del ser: masa, éter y la unificación de fuerzas*. Trad. de Rosa M. Salleras Puig. Barcelona: Crítica, 2009.

∫ Zeh, H. Dieter. *The Physical Basis of the Direction of Time*. 4.ª ed. Berlín: Springer, 2002.



Max Tegmark (nacido el 5 de mayo de 1967) es un cosmólogo sueco-estadounidense. Es profesor en el Instituto Tecnológico de Massachusetts y pertenece a la dirección científica del Instituto de Cuestiones Fundamentales.

Nacido en Estocolmo, Tegmark dejó Suecia en 1990 después de recibir su licenciatura en Física del Royal Institute of Technology (había obtenido una licenciatura en Economía el año anterior en la Escuela de Economía de Estocolmo). Su primera aventura académica más allá de Escandinavia lo llevó a California, donde estudió física en la Universidad de California, Berkeley, donde obtuvo su maestría en 1992 y su doctorado en 1994.

Tegmark es autor de más de doscientos artículos técnicos y ha aparecido en docenas de documentales científicos. Ha recibido numerosos premios por su investigación, incluida una beca Packard (2001-06), el premio Cottrell Scholar (2002-07) y una beca NSF Career (2002-07), y es miembro de la American Physical Society.

Índice de contenido

Notas

[1] *The Matrix* y *The Thirteenth Floor* son los títulos originales de estas dos películas que se conocieron en castellano como *Matrix* y *Nivel 13* (en España) o *El piso 13* (en Argentina). *(N. de la T.)* <<

[2] Douglas Adams, *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*. Versión en castellano: *Guía del autoestopista galáctico*. Trad. de Benito Gómez Ibáñez. Barcelona: Anagrama, 2010. *(N. de la T.)* <<

[3] A veces esa conversación empieza así: «¡Oh, astrología! Yo soy Virgo». Si, por el contrario, me da por ser más específico y responder: «Cosmología», me he encontrado con respuestas como «¡Oh, cosmetología!», seguidas de consultas sobre delineadores de ojos y máscaras de pestañas. <<

[4] Richard P. Feynman, *Surely You’re Joking, Mr. Feynman!* Versión en castellano: *¿Está usted de broma, sr. Feynman?*, Trad. de Luis Bou García. Madrid: Alianza Editorial, 2010. *(N. de la T.)* <<

[5] Feynman, Richard, Robert Leighton y Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*. 3 vols. Versión en castellano: *Física*. Trad. de Enrique Oelker [*et al.*]. México: Pearson Educación, 1998. *(N. de la T.)* <<

[6] Douglas Adams, *The Hitchhiker’s Guide to the Galaxy*. Versión en castellano: *Guía del autoestopista galáctico*. Trad. de Benito Gómez Ibáñez. Barcelona: Anagrama, 2010. *(N. de la T.)* <<

[7] El radio de la Tierra viene a medir $d^2/2h$, donde *d* es la mayor distancia a la que se alcanza a ver una vela de una altura *h* sobre el nivel del mar. **<<**

[8] Desde una perspectiva matemática, los distintos puntos de vista corresponden a diferentes opciones de coordenadas espaciales, y la teoría de Einstein permite elegir el sistema de coordenadas que se prefiera para el espacio y el tiempo. <<

[9] El deuterio es el hermano mayor del hidrógeno y pesa el doble que él porque porta no solo un protón, sino también un neutrón. <<

[10] La nucleosíntesis primordial generó el 25 % del helio existente, el resto lo crearon las estrellas. Los telescopios permiten diferenciar con claridad ambas fuentes de helio: cuanto más atrás en el tiempo observamos, menos helio vemos, y su abundancia cae hasta el 25 % cuando nos remontamos a épocas anteriores a la formación de la mayoría de las estrellas. <<

[11] Literalmente, ‘judía mágica’. *(N. de la T.)* <<

[12] La traducción literal de estos versos es «Tan excelsa sobre el mundo, como un diamante en el firmamento». *(N. de la T.)* **<<**

[13] Douglas Adams, *The Restaurant at the End of the Universe*. Versión en castellano: *El restaurante del fin del mundo*. Trad. de Benito Gómez Ibáñez. Barcelona: Anagrama, 2008. *(N. de la T.)* <<

[14] Pocos descubrimientos científicos importantes son obra de una sola persona, y el descubrimiento y desarrollo de la inflación no es una excepción que contó con la participación crucial de Alan Guth, Andréi Linde, Alekséi Starobinski, Katsuhiko Sato, Paul Steinhardt, Andy Albrecht, Viacheslav Mujánov, Gennadi Chibísov, Stephen Hawking, So-Young Pi, James Bardeen, Michael Turner, Aleks Vilenkin y otros. Se han escrito crónicas históricas muy interesantes sobre el tema en muchos de los libros sobre inflación que figuran en el apartado titulado «Lecturas adicionales recomendadas» del final del libro. <<

[15] Ni siquiera hemos medido con suficiente precisión la intensidad de la gravitación como para saber cómo deberían ser los dígitos siguientes a los 4 primeros, así que los últimos 20 dígitos son una estimación mía con fines ilustrativos. <<

[16] Tal como señalaron Phillip Helbig y otros, el problema de la curvatura nula suele tergiversarse y exagerarse, pero sigue siendo muy grave debido a la estructura cósmica que comentamos en el último capítulo, la cual provoca desviaciones aleatorias de la curvatura nula desde bien pronto. <<

[17] Brian Greene, *The Hidden Reality*. Versión en castellano: *La realidad oculta*. Trad. de Javier García Sanz. Barcelona: Crítica, 2011. (*N. de la T.)* **<<**

[18] Como vimos en el capítulo 3, esto es más de catorce mil millones de años-luz porque la luz contó con la ayuda de la expansión del espacio durante el recorrido. <<

[19] Aunque, en principio, se puede entrar en un agujero negro y observar qué sucede en su interior (si las fuerzas de marea no nos «espaguetizan» antes), no podríamos publicar los descubrimientos que hiciéramos en una revista científica, porque en realidad viajaríamos allí con un billete solo de ida. <<

[20] Si la expansión cósmica siguiera acelerándose (una cuestión abierta en la actualidad), llegaría un momento en que el universo observable dejaría de crecer: todas las galaxias situadas más allá de cierta distancia concreta acabarían alejándose más deprisa que la velocidad de luz y quedarían para siempre fuera del alcance de nuestra vista. <<

[21] Se trata de una estimación muy conservadora que solo tiene en cuenta todos los estados cuánticos posibles de un universo (volumen del horizonte) a una temperatura no superior a 10^8 grados. Aunque el cálculo real requiere detalles mecánicocuánticos, el número 10^{118} viene a ser la cantidad de protones que el llamado *principio de exclusión* de Pauli permitiría empaquetar dentro de un universo a esta temperatura (nuestro propio universo contiene tan solo unos 10^{80} protones). Hay $2^{10^{118}} \sim 10^{10^{118}}$ posibilidades de que cada uno de esos 10^{118} huecos esté ocupado o no. <<

[22] Esto es 2 elevado a la potencia del área de superficie de nuestro universo medida en lo que se conoce como unidades de Planck. Los libros de Lenny Susskind y Brian Greene que figuran en el apartado «Lecturas adicionales recomendadas» describen en detalle el principio holográfico y cómo se desarrolló a partir de ideas de Gerard t’Hooft, Lenny Susskind, Charles Thorn, Raphael Bousso, Jacob Bekenstein, Stephen Hawking, Juan Maldacena y otros. <<

[23] Si la energía oscura se mantiene de forma que la aceleración cósmica prosiga en este universo, entonces hasta la mayor parte de los universos paralelos del nivel I permanecerán separados para siempre, porque el espacio intermedio se estiraría más deprisa de lo que viaja la luz a través de ellos. Aún no conocemos lo bastante bien la energía oscura como para saber si esto sucederá. <<

[24] Para conocer en detalle cómo se descubrió y estudió el multiverso del nivel II por parte de Andréi Linde, Aleks Vilenkin, Alan Guth, Sidney Coleman, Frank de Luccia, Raphael Bousso, Joe Polchinski, Lenny Susskind, Shamit Kachru, Renata Kallosh, Sandip Trivedi y otros, recomiendo las obras recientes de Brian Greene, Lenny Susskind y Aleksandr Vilenkin que aparecen en la sección «Lecturas adicionales recomendadas» al final de este libro. Los libros de Greene y Susskind constituyen una buena introducción a la teoría de cuerdas de la mano de dos de sus iniciadores. <<

[25] Existen 80 tipos de átomos estables que contienen todas las cantidades de protones que van desde el 1 (hidrógeno) hasta el 82 (plomo), salvo el que tiene 43 (tecnecio) y el que tiene 61 (prometio), que son radiactivos e inestables. Muchos de estos átomos tienen diversas variantes estables, los llamados *isótopos*, formadas por cantidades distintas de neutrones; la cantidad total de isótopos atómicos estables asciende a 257. En la Tierra existen de manera natural unos 338 isótopos si contamos unos 30 isótopos con vidas medias superiores a ochenta millones de años y unos cincuenta más de vida corta. <<

[26] La *cantidad de movimiento* de algo mide el ímpetu inherente a ese objeto en caso de chocar contra otro; o, dicho con más rigor, la cantidad de tiempo que hace falta para pararlo multiplicada por la fuerza media que hay que oponer para ello. La cantidad de movimiento p de algo con una masa m y que se mueve a una velocidad v viene dada simplemente por $p = mv$, siempre que v sea muy inferior a la velocidad de la luz. **<<**

[27] El electrón daría unas $1/8\pi\alpha^3 \sim 10^5$ órbitas antes de precipitarse contra el protón, donde $\alpha \approx 1/137{,}03599968$ es una medida adimensional de la intensidad de la fuerza electromagnética, cantidad también conocida como constante de estructura fina. Hay una deducción estupenda de la espiral suicida aquí: **http://www.physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/orbitdecay.pdf**.
<<

[28] En realidad, lo que hizo Bohr (que es equivalente desde una perspectiva matemática) fue admitir que el *momento angular* de la órbita del electrón está cuantizado, y solo puede corresponderse con algún múltiplo n de lo que se llama la *constante reducida de Planck* $\hbar$, definida como $\hbar/2\pi$. El momento angular de un objeto en rotación se puede concebir, de forma análoga a la cantidad de movimiento, como una medida de la cantidad de tiempo que tardará en detenerse multiplicada por el promedio del momento de fuerza (fuerza de torsión) que haya que aplicarle. Algo que orbite en circunferencias con un radio r y una cantidad de movimiento p tendrá un momento angular rp. <<

[29] Las energías de las órbitas son E_1/n^2 donde el número negativo E_1 es la energía conocida de la órbita más baja, así que al saltar entre dos órbitas n_1 y n_2, el electrón emite fotones de todas las energías dadas por la fórmula $(1/n_2^2 - 1/n_1^2)\,E_1$. <<

[30] Este mismo fenómeno se ha observado en neumáticos de coche a gran velocidad, y las ondas sonoras resultantes que se desplazan por el tubo en resonancia pueden salir muy caras. <<

[31] En concreto, si una partícula tiene una incertidumbre en la posición Δx y una incertidumbre en la cantidad de movimiento Δp, el principio de incertidumbre de Heisenberg establece que $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$, donde $\hbar$ es la constante reducida de Planck $h/2\pi$ como antes. Desde un punto de vista matemático, la incertidumbre de cada cantidad se define como la desviación estándar en su distribución de probabilidad. <<

[32] De hecho, cabría aducir que esta última no debería contar porque se puede redefinir la unidad de tiempo de modo que valga 1. Si deseamos una precisión mayor para que todos los decimales coincidan con las medidas, basta con añadir unos cuantos números más para mejorar el modelo de las masas exactas de cada núcleo atómico distinto (los neutrones pesan un 0,1 % más que los protones, etc.). <<

[33] Si se le da bien el cálculo de vectores, piense que el estado no es más que el vector posición **r** y su derivada temporal **ŕ** (el vector velocidad). <<

[34] Si le gustan las matemáticas y los números complejos, le encantará saber que la función de onda de una partícula especifica un número complejo $\psi(\mathbf{r})$ para cada lugar **r** del espacio. Lo que denomino en este libro de manera informal el «cuadrado» de la función de onda por abreviar, es en realidad $|\psi|^2$, el cuadrado del valor absoluto $|\psi|$ de la función de onda, que se define como la parte real al cuadrado más la parte imaginaria al cuadrado. Si, por el contrario, no le apasionan las matemáticas, no se preocupe, porque igualmente entenderá los razonamientos esenciales de este libro. <<

[35] Un experimento clásico para lograrlo consiste en enviar un solo átomo de plata a través de lo que se denomina un aparato de Stern-Gerlach, que lo mandará a lugares diferentes dependiendo de su espín. <<

[36] El periódico estudiantil *The Daily Cal* publicó unas palabras mías seguidas por la aclaración «según un estudiante sueco que residía en el pasillo de enfrente y pidió permanecer en el anonimato». Durante varios días después de aquello mis amigos se me acercaban y me decían: «¡Eh, Max, hoy te veo muy anónimo!». <<

[37] Esta tesis se publicó al fin en Internet en 2008, y se puede leer en **http://www.pbs.org/wgbh/nova/manyworlds/pdf/dissertation.pdf**. La noción de que en ciertos casos mágicos la realidad experimenta alguna suerte de división metafísica en dos ramas que con posterioridad nunca llegan a interaccionar no solo constituye una deformación de la tesis de Everett, sino también algo incompatible con el postulado de Everett de que la función de onda jamás se colapsa, ya que los acontecimientos subsiguientes podrían en principio hacer que esas ramas interfirieran entre sí. Según Everett, hay, hubo y siempre habrá una única función de onda, y solo los cálculos de decoherencia (que explicaré más adelante en este capítulo), y no los postulados, pueden decirnos cuándo será una buena aproximación considerar que ambas ramas no interaccionan. <<

[38] En la práctica, este naipe inestable enseguida entrará en contacto con alguna corriente de aire minúscula, así que sería mejor elegir una carta normal con un borde inferior grueso y usar un dispositivo cuántico, como el disparador de átomos radiactivos de Schrödinger, para empujarla en una dirección u otra. <<

[39] La función de onda corresponde a un solo punto dentro de este espacio de infinitas dimensiones, y la ecuación de Schrödinger dice que este punto orbitará alrededor del centro del espacio a una distancia fija. <<

[40] Conviene señalar que el teorema de Borel dejó muy impresionados a muchos matemáticos de la época, algunos de los cuales consideraban el concepto de probabilidad demasiado filosófico para calificarlo de matemáticas rigurosas. De repente, Borel los enfrentó a un teorema crucial de las matemáticas clásicas que podía reinterpretarse en términos de probabilidades incluso aunque el teorema en sí no llegara a hablar en absoluto de probabilidades. Es indudable que a Borel le habría gustado saber que su obra supuso la emergencia de las probabilidades «a partir de la nada» no solo en matemáticas, sino también en física. <<

[41] Las matrices de densidad son generalizaciones de las funciones de onda. Para cada función de onda existe una matriz de densidad correspondiente, y hay una ecuación de Schrödinger para las matrices de densidad. Si usted suele leer textos matemáticos y considera la función de onda ψ como un número complejo ψ_i para cada posible estado *i*, entonces la matriz de densidad correspondiente es $\rho_{ij} = \psi_i \psi_j^*$ donde el asterisco denota conjugación compleja. Si no conoce la función de onda de un objeto y solo sabe la probabilidad de que tenga ciertas funciones de onda particulares, debería usar una matriz de densidad construida como la media ponderada de las matrices de densidad correspondientes a esas funciones de onda. <<

[42] Afirmaban que el modelo de microtúbulos que yo había analizado no era del libro de Roger Penrose, pero en 2006 Stuart admitió que sí lo era. Asimismo, manifestaban que mis cálculos debían de contener algún error porque el intervalo temporal que yo había deducido para la decoherencia descendía a medida que bajaba la temperatura del cerebro, mientras que lo esperable sería lo contrario. El detalle que pasaron por alto es que en cuanto la temperatura absoluta cae alrededor del 10 %, por debajo de 0 grados Celsius, el cerebro se congela, y la duración de la decoherencia experimenta un aumento espectacular. La ligera disminución del tiempo de la decoherencia ante descensos minúsculos de temperatura refleja el hecho bien conocido de que cuando baja la temperatura es más probable que las cosas choquen entre sí, del mismo modo que dentro de un reactor nuclear es más probable que den en el objetivo los neutrones lentos que los rápidos. También sostenían que el cerebro podría realizar cómputos cuánticos usando otros mecanismos; sin embargo, no especificaban esos mecanismos con suficiente detalle como para poder comprobarlos, y que tal vez haya otros efectos cuánticos en el cerebro que no sean de carácter computacional, con lo cual nunca he discrepado de entrada. <<

[43] Con esto no me refiero a todo el cerebro, sino tan solo a aquellos aspectos de él que se corresponden con las percepciones subjetivas de la consciencia de quien observa. <<

[44] Si no le asustan las matemáticas, el artículo también explica que la combinación de este resultado con la inflación puede explicar que la entropía fue muy baja en nuestro universo temprano, lo que a su vez explica la llamada flecha del tiempo (perfectamente explicada en los libros de Sean Carroll y Dieter Zeh que figuran en el apartado «Lecturas adicionales recomendadas»). Asimismo, contiene una generalización mecánico-cuántica del procedimiento estándar para actualizar el conocimiento con información nueva, conocido como teorema de Bayes. <<

[45] Por ejemplo, la partícula podría ser un átomo de plata cuyo espín se mide mediante lo que se denomina un aparato Stern-Gerlach, o también podría ser un fotón que pasara o no pasara a través de un espejo semirreflectante. <<

[46] El filósofo británico Paul Almond tiene un argumento interesante en contra de esta afirmación que expondré en el capítulo 11. <<

[47] Douglas Adams, *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*. Versión en castellano: *Guía del autoestopista galáctico*. Trad. de Benito Gómez Ibáñez. Barcelona: Anagrama, 2010. *(N. de la T.)* <<

[48] Me sorprende que se hable tanto de los «cálculos hechos en el reverso de sobres» cuando, en mi caso personal, la mayoría de los cálculos improvisados son siempre en servilletas, a pesar de su tendencia a rasgarse y de tener, en general, menos calidad como soporte para la escritura. <<

[49] Encontrará referencias a todas estas interpretaciones en la página en inglés: **http://arxiv.org/abs/10081066**. **<<**

[50] Por desgracia, en castellano no se puede reproducir el sencillo juego de palabras que sí permite hacer la lengua inglesa con *worlds* y *words*. *(N. de la T.)* <<

[51] Para iniciarse en la vasta producción bibliográfica de psicólogos, neurocientíficos, filósofos y demás sobre la consciencia, recomiendo los libros sobre la mente que figuran en el apartado de «Lecturas adicionales recomendadas». <<

[52] Einstein se dio cuenta de que, mientras los observadores situados en un mismo lugar y sometidos al mismo movimiento comparten una realidad consensuada común, dos grupos que se mueven uno en relación con el otro, tendrán realidades consensuadas distintas. En otras palabras, puede haber muchas realidades consensuadas diferentes, pero esas diferencias se explican a través de efectos físicos que no tienen nada que ver con la consciencia ni con la estructura interna de los observadores. <<

[53] En la página de Internet nobelprize.org se lee que el Premio Nobel de 1922 se le concedió a Albert Einstein «por sus aportaciones a la física teórica, y en especial por el descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico». Sin embargo, un compañero sueco que tengo en el Comité del Nobel me enseñó una vez la versión completa, menos conocida, del comunicado del premio. En la traducción que he hecho del mismo y que incluyo más abajo, he marcado en negrita una observación hilarante que al parecer introdujeron algunos dinosaurios para dejar constancia de sus reservas acerca de la teoría de la relatividad, aclamada hoy como uno de los grandes logros de la mente humana:

> LA REAL ACADEMIA SUECA DE CIENCIAS, en la reunión celebrada el 9 de noviembre de 1922 de acuerdo con las regulaciones del testamento de ALFRED NOBEL del 27 de noviembre de 1895, ha decidido, **con independencia del valor que se le acabe atribuyendo tras una posible confirmación a su teoría de la relatividad y la gravitación**, otorgar el premio destinado a la persona que en 1921 haya realizado el descubrimiento o la invención más importante dentro del ámbito de la física, a ALBERT EINSTEIN por sus aportaciones a la física teórica, en especial por el descubrimiento del efecto fotoeléctrico. <<

[54] También me cuidé de que los artículos de Mr. Hyde salieran en fechas estratégicas. Igual que en política gustan de soltar noticias impopulares con discreción los viernes por la tarde para que la gente tenga tiempo de olvidarlas antes de que empiece el ciclo de noticias de la semana siguiente, yo escribí aquel artículo que calificaron como disparatado durante el verano de 1996, justo después de que me ofrecieran el trabajo de investigador posdoctoral en Princeton, porque sabía que eso le daría a la gente el plazo máximo para olvidarlo antes de que tuviera que volver a pedir trabajo. <<

[55] He pasado de coleccionar sellos a coleccionar preguntas curiosas cuya respuesta es 42. Estas son mis favoritas por el momento:

¿Desde qué latitud se escribió este libro?

¿Qué radio tiene el arcoíris expresado en grados?

¿Qué porcentaje máximo del gas circundante engulle un agujero negro?

Dar de comer a un agujero negro se parece mucho a dar de comer a un bebé: la mayoría de la materia sale volando en sentido opuesto a gran velocidad… los agujeros negros engullen un máximo de $1 - 1/\sqrt{3} = 42\,\%$ del gas circundante. <<

[56] En realidad, si se comprime todo el planeta en un agujero negro central para evitar que la pelota de baloncesto de la figura 10.2 choque contra el suelo, entonces la parte parabólica de la trayectoria del balón seguirá igual y se alargará hasta formar una elipse completa alrededor del agujero negro. <<

[57] Si se pregunta cómo es posible medir esa razón de un modo más preciso que cada una de las dos masas por separado, se debe a que ambos errores de medición están íntimamente relacionados (correlacionados). <<

[58] Mario Livio, *Is God a Mathematician?* Versión en castellano: *¿Es Dios un matemático?* Trad. de Francesc Pedrosa. Barcelona: Ariel, 2009. *(N. de la T.)* <<

[59] En el ámbito de la filosofía, John Worrall ha acuñado el término de *realismo estructural* como una postura intermedia entre el realismo científico y el antirrealismo; es decir, la naturaleza fundamental de la realidad solo se describe bien mediante el contenido matemático o estructural de las teorías científicas. Distintos filósofos de la ciencia han interpretado y refinado el término de diversas maneras, y Gordon McCabe ha manifestado que la expresión *realismo estructural universal* debería aplicarse a mi hipótesis de que nuestro universo físico es isomorfo a una estructura matemática. **<<**

[60] El cerebro tal vez sirva como ejemplo adicional de que las propiedades proceden sobre todo de las relaciones. De acuerdo con la llamada hipótesis de las células de concepto en neurociencia, determinados patrones de activación en distintos grupos de neuronas se corresponden con diferentes conceptos. Está claro que la diferencia principal entre las células de concepto para *rojo, mosca* y *Angelina Jolie* no estriba en el tipo de neuronas implicadas, sino en sus relaciones (conexiones) con otras neuronas. **<<**

[61] Esta idea del tiempo como la cuarta dimensión de una realidad inmutable la han defendido y estudiado muchos, entre ellos H. G. Wells en la novela de 1895 *La máquina del tiempo (The Time Machine)*. Julian Barbour brinda una exposición de la idea y de su historia en la obra *The End of Time.* **<<**

[62] Para no complicar las cosas, la figura 11.1 ignora el hecho de que tanto la Tierra como la Luna rotan sobre sí mismas, que la órbita de la Luna es ligeramente oblonga (es una elipse más que un círculo perfecto), y que el tirón gravitatorio de la Luna hace que la Tierra también siga un movimiento circular cuyo radio ronda el 74 % del radio terrestre. <<

[63] En su libro *La realidad oculta: Universos paralelos y las profundas leyes del cosmos*, Brian Greene hace hincapié en esta conclusión señalando que, según la teoría de la relatividad de Einstein, el corte horizontal que separa el pasado del futuro en la figura 11.2 se inclina si empezamos a movernos; está claro que no puede haber ninguna diferencia fundamental entre pasado y futuro si el mero hecho de caminar más deprisa permite reclasificar la explosión de una supernova distante de evento ya ocurrido a acontecimiento aún por suceder. **<<**

[64] Brian Greene, *The Hidden Reality*. Versión en castellano: *La realidad oculta*. Trad. de Javier García Sanz. Barcelona: Crítica, 2011. *(N. de la T.)* **<<**

[65] Marius Cohen, «On the Possibility of Reducing Actuality to a Pure Mathematical Structure» (tesina por la Universidad Ben-Gurion del Néguev, Israel, 2003). <<

[66] Si tiene usted alguna formación matemática y conoce la noción de isomorfismo, podrá reformular este razonamiento del siguiente modo. De la definición de estructura matemática se desprende que si existe algún isomorfismo entre una estructura matemática y otra estructura (una correspondencia biunívoca entre ambas que respeta las relaciones), entonces son una misma estructura. Si nuestra realidad física exterior es isomorfa a una estructura matemática, entonces concuerda con la definición de estructura matemática. <<

[67] Si las instrucciones para ensamblar mi clon se transmitieran de forma inalámbrica desde un escáner corporal que analizara mi original, entonces mis trenzas espaciotemporales y las de mi clon seguirían estando conectadas mediante un patrón muy elaborado en el campo electromagnético. Pero una copia idéntica de mí que se despertara en el multiverso del nivel I del capítulo 6 también se sentiría conectada a *C*, sin necesidad de ninguna transferencia de información entre ambas copias. <<

[68] Para conocer los detalles del debate sobre la percepción del tiempo y la rica bibliografía escrita sobre el tema durante los dos últimos milenios, consúltese **http://plato.stanford.edu/entries/time-experience**. Hace mil seiscientos años san Agustín ya exploró la idea de que aspectos clave de la percepción del tiempo, como la duración, solo se pueden explicar como percepciones de la memoria; la hipótesis del universo matemático confiere un nuevo carácter de urgencia a estas cuestiones. <<

[69] Lo que llamo aquí de manera informal *contenido de información* de un objeto se denomina en términos técnicos la información mutua entre el objeto y el resto del mundo. <<

[70] Esto guarda una relación estrecha con los llamados sistemas de redundancia y de corrección de errores usados en los códigos de barras, discos duros, telefonía móvil y otras tecnologías modernas de información: se usan más bits que los mínimos necesarios para codificar la información, y se hace de una manera conjunta inteligente de tal modo que no se pierda nada de información aunque falte alguna fracción pequeña de bits. El cerebro humano parece emplear una arquitectura redundante similar, puesto que no parece tener una dependencia crítica de ninguna neurona concreta, y sigue funcionando bien aunque muera una cantidad modesta de ellas. Tal vez parte de la razón de que evolucionara la consciencia estriba en que esta redundancia es útil desde un punto de vista evolutivo. <<

[71] Nótese que muchos personajes de *The Matrix* viven experiencias simuladas dentro de cerebros humanos; en cambio, la gente simulada en la película *Nivel 13* (o *El Piso 13*, en Argentina) no implica ningún *hardware* humano en absoluto. <<

[72] En la filosofía de la ciencia, el planteamiento convencional sostiene que una teoría de física matemática se puede descomponer en (i) una estructura matemática, (ii) un ámbito empírico y (iii) un conjunto de reglas de correspondencia que conectan partes de la estructura matemática con partes del ámbito empírico. Si la HUM es correcta, entonces (ii) y (iii) son redundantes en tanto que, al menos en principio, se pueden inferir a partir de (i), y por tanto podrían entenderse como un práctico manual de instrucciones para la teoría definida por (i). **<<**

[73] De hecho, tal como señaló Ken Wharton en su artículo «The Universe Is Not a Computer», disponible en **http://arxiv.org/pdf/12117081.pdf**, puede que nuestras leyes de la física sean tales que el pasado no determine el futuro de manera única, de modo que la idea de que nuestro universo pueda ser simulado en principio es una hipótesis que no deberíamos dar por sentada. **<<**

[74] Si hay *n* signos al azar, la probabilidad de que quede algún hueco donde se permita aparcar es $(n + 1)/2^n$: una vez colocadas las señales, habrá 2^n maneras de orientar las que tienen flechas a izquierda y derecha, y solo $n + 1$ de esas maneras se corresponderán con todas las señales con flechas a la izquierda situadas a la izquierda de todas las señales con flechas hacia la derecha. <<

[75] Es fácil generalizar esta definición discreta de ajuste preciso a casos en los que pueda variar más de un parámetro. <<

[76] Esta ampliación de nuestra ontología en física recuerda a la ampliación que experimentó nuestra ontología en matemáticas a lo largo de los siglos pasados. En matemáticas esto se denomina *generalización*: la percepción de que lo que estamos estudiando forma parte de una estructura mayor. <<

[77] Como buenas introducciones al riesgo existencial recomiendo consultar **http://www.existential-risk.org** y el libro de Martin Rees *Nuestra hora final* (*Our Final Hour*). <<

[78] La mayoría de las inestabilidades implica alguna clase de reacción en cadena o de autorreproducción desbocada: por ejemplo, la quema de árboles en un bosque provoca la quema de más árboles, los neutrones libres de una bomba nuclear generan más neutrones libres, un portador de la peste bubónica produce más portadores, y un consumidor de un producto de gran éxito atrae a más consumidores. <<

[79] El economista Robin Hanson ha hecho una puntualización interesante sobre este primer supuesto. La incompatibilidad aparente entre la abundancia de planetas habitables en nuestra Galaxia y la ausencia de visitas extraterrestres, lo que se conoce como *paradoja de Fermi*, sugiere la existencia de lo que Hanson denomina un «gran filtro», una barricada evolutiva/tecnológica en algún punto del proceso de desarrollo desde la materia inerte hasta la vida colonizadora del espacio. Si descubriéramos vida primitiva que haya tenido un desarrollo independiente dentro del Sistema Solar, cabría pensar que la vida primitiva no escasea, y que la barricada se halla en algún punto posterior a la etapa actual en el desarrollo de la humanidad, tal vez porque el primer supuesto es falso o porque casi todas las civilizaciones avanzadas se autodestruyen antes de tener la capacidad de emprender la colonización. Así que cruzo los dedos para que todas las búsquedas de vida en Marte y en otros lugares no encuentren nada: eso sería compatible con el supuesto de que la vida primitiva es rara, pero los humanos tuvimos suerte, así la barricada quedaría ya a nuestras espaldas y tendríamos unas posibilidades extraordinarias de futuro. <<

[80] Olaf Stapledon, *Star Maker*. Versión en castellano: *Hacedor de estrellas*. Trad. de Gregorio Lemos. Barcelona: Minotauro, 2008. *(N. de la T.)* **<<**

[81] En cambio, John Gribbin llega a una conclusión parecida en su libro de 2011 *Alone in the Universe (Solos en el universo)*. Para conocer un abanico de perspectivas fascinantes sobre esta cuestión, recomiendo también el libro de 2011 de Paul Davies titulado *The Eerie Silence (Un silencio inquietante)*. <<

[82] Para la edición en castellano de esta obra, se han hecho todos los esfuerzos posibles por identificar e incluir las versiones en nuestra lengua de las obras que cuentan con traducción *(N. de la T.)*. <<

Max Tegmark

En busca de la naturaleza última de la realidad

